



Uleam

UNIVERSIDAD LAICA
ELOY ALFARO DE MANABÍ

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA INGENIERÍA ELÉCTRICA**

PROYECTO TÉCNICO

TÍTULO:

**“ANÁLISIS COMPARATIVO TÉCNICO-ECONÓMICO
ENTRE PANELES SOLARES ESTÁTICOS Y PANELES
CON SISTEMA DE SEGUIMIENTO DE DOS EJES
INSTALADOS EN LA CIUDAD DE MANTA-ULEAM”**

AUTORES:

REYES MERO MARÍA MERCEDES

SALVADOR TUÁREZ IVÁN FERNANDO

ASESOR ACADÉMICO:

ING. MARCOS ANTONIO PONCE JARA, PHD

MANTA – ECUADOR

AGOSTO - 2021

CERTIFICACIÓN

En calidad de docente tutor(a) de la Facultad de Ingeniería, carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, certifico:

Haber dirigido y revisado el trabajo de titulación, cumpliendo el total de 120 horas, bajo la modalidad de PROYECTO DE INVESTIGACION, cuyo tema del proyecto es **“Análisis comparativo técnico-económico entre un paneles solares estáticos y paneles con sistema de seguimiento de dos ejes instalados en la ciudad de Manta-Uleam ”**, el mismo que ha sido desarrollado de acuerdo a los lineamientos internos de la modalidad en mención y en apego al cumplimiento de los requisitos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico, por tal motivo CERTIFICO, que el mencionado proyecto reúne los méritos académicos, científicos y formales, suficientes para ser sometido a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

La autoría del tema desarrollado corresponde a **Reyes Mero María Mercedes y Salvador Tuárez Iván Fernando**, estudiantes de la carrera de Ingeniería Eléctrica, período académico 2020-2021 (2), quienes se encuentran aptos para la sustentación de su trabajo de titulación.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Manta, 23 de agosto de 2021.

Lo certifico,



Marcos Ponce Jara. PhD
Docente Tutor(a)

DECLARACION DE AUTORIA

La responsabilidad de este proyecto de titulación : **ANALISIS COMPARATIVO TECNICO-ECONOMICO ENTRE PANELES SOLARES ESTATICOS Y PANELES CON SISTEMAS DE SEGUIMIENTO DE DOS EJES INSTALADOS EN LA CIUDAD DE MANTA ULEAM**” corresponde exclusivamente a REYES MERO MARIA con C.I. 1724850522 y SALVADOR TUAREZ IVAN FERNANDO con C.I. 1721244983 y los derechos patrimoniales del mismo a la Universidad Laica “Eloy Alfaro de Manabí

Manta, agosto 2021

LOS AUTORES

Reyes Mero María Mercedes
C.I: 1724850522

Salvador Tuárez Iván Fernando
C.I: 1721244983

TRABAJO DE TITULACION MODALIDAD PROYECTO INVESTIGATIVO

PREVIO A LA OBTENCION DEL TITULO DE: INGENIERO ELECTRICO

“ANALISIS COMPARATIVO TECNICO-ECONOMICO ENTRE PANELES SOLARES ESTATICOS Y PANELES CON SISTEMA DE SEGUIMIENTO DE DOS EJES INSTALADOS EN LA CIUDAD DE MANTA-ULEAM”

Tribunal examinador que declara APROBADO el grado de INGENIERO ELECTRICO, a los señores: REYES MERO MARIA MERCEDES Y SALVADOR TUAREZ IVAN FERNANDO

Ing. Carlos Geovanny Delgado Castro, Mg.

Ing. Edwin Bernardo Ponce Minaya, Mg.

Ing. Carlos Alberto Velásquez Figueroa, Mg

Manta, Agosto 2021

DEDICATORIA

Las palabras más difíciles de pensar son aquellas que se escriben para personas que ya no se encuentran con nosotros. Dedico este trabajo a dos seres que partieron de este mundo hace ya un año, personas que creyeron en mí siempre. Desde el mundo terrenal hasta el cielo este logro es para Uds. Papi Roberto y Tío Eulogio, no están conmigo físicamente pero que se están orgullosos de la mujer en la que me eh convertido.

A mis hermanos, por ser incondicionales, por el amor que me brindan, por las palabras de aliento que me brindaban cada vez que iban a visitarme. Esto también es por Uds.

María

DEDICATORIA

Este trabajo de tesis va dedicado a mis padres que siempre me dieron su apoyo incondicional, amor y confianza permitieron que logre culminar mi carrera profesional.

A mis hermanos que son parte de mí día a día, con los que he compartido buenos y malos momentos, y que sigamos llevándonos bien con el paso de los años.

Iván.

AGRADECIMIENTO

La gratitud debería ser un acto constante de cada hora, de cada día, de toda la vida, por ello quiero expresar mi agradecimiento:

A mis padres Jorge y Rosario por darme la oportunidad de ir a otra ciudad a cumplir mis sueños, por brindarme su amor incondicional, su apoyo económico, por hacer de mí una mujer de bien y por toda la comprensión que me brindaron en el camino, no me alcanzara la vida entera para pagarles lo que han hecho por mí, los amo con todo mi corazón papitos de mi vida.

A mi segunda madre Idauria Mero, por abrirme las puertas de su hogar, por brindarme amor, por regalarme muchas veces una palabra de aliento o un plato de comida, ya que a pesar de las diferencias que muchas veces tuvimos siempre estuvo pendiente de mi bienestar, gracias Mami Ida la quiero muchísimo.

A mi prima Paula que también es como una madre para mí, por regalarme momentos únicos, por cada palabra, cada regaño, por dejarme entrar en su familia y hacerme sentir parte de ella, gracias Pau, te adoro.

Al encontrarme en una ciudad sola conocí a personas maravillosas que me brindaron su amistad, amor, palabras de ánimos y muchos buenos momentos, gracias totales a todos y cada uno de ellos: mi compañero de vida Anderson, y a mis amigos Carlos, Miguel, Victoria, Iván, Ronald, Kevin y Jorge los llevo siempre presente.

A mi tutor el PHD. Marcos Ponce Jara por la paciencia brindada, y por guiarme en el proceso.

Y un agradecimiento muy especial al Sr. Iván Salvador por ser guía en el proceso de construcción e instalación del seguidor solar.

María

AGRADECIMIENTO

A mis padres Iván y Soraya, por darme la oportunidad de estudiar y porque nunca me faltó nada para poder cumplir con esta meta.

A mi hermano Oscar por ser un gran hermano, y estar siempre ahí cuando lo he necesitado.

A nuestro tutor el PHD. Marcos Ponce Jara por ser una guía en este trabajo de titulación

A los docentes de la carrera de Ing. Eléctrica que nos han formado con sus conocimientos y consejos para ser grandes profesionales.

Iván.

SINTESIS

La energía solar fotovoltaica se ha explorado como una de las alternativas de producción de energía limpia y libre de contaminación. Sin embargo, generar electricidad a través de sol aún se considera no competitivo debido a los costos de producción. Tras varios años de estudios en intentos de mejora y buscando eficiencia en paneles solares, se ha apostado por desarrollar dispositivos que sigan la trayectoria del sol durante el día. Considerando lo antes mencionado, este trabajo tiene como objetivo realizar un análisis comparativo técnico-económico entre un panel solar instalado de manera estática y un seguidor solar de dos ejes instalados en la ciudad de Manta. La ciudad en la que se va a realizar el estudio se encuentra ubicado en el perfil costero de Ecuador, donde existen altos niveles de radiación debido a su clima tropical seco. Luego de ensamblar el seguidor solar e instalar de manera estática un panel solar fijo se realizó un análisis operativo y comparativo de desempeño entre ambos sistemas, lo que permitió concluir que el panel que utiliza el sistema de seguimiento es más eficiente que el sistema que se colocó de manera fija.

PALABRAS CLAVES

Seguidor solar, radiación, eficiencia, paneles solares, energía solar fotovoltaica

ABSTRACT

Photovoltaic solar energy has been explored as one of the alternatives for the production of clean and pollution-free energy. However, generating electricity through the sun is still considered uncompetitive due to production costs. After several years of studies in attempts to improve and looking for efficiency in solar panels, it has opted to develop devices that follow the path of the sun during the day. Considering the aforementioned, this work aims to carry out a comparative technical-economic analysis between a statically installed solar panel and a two-axis solar tracker installed in the city of Manta. The city in which the study will be carried out is located in the coastal profile of Ecuador, where there are high levels of radiation due to its dry tropical climate. After assembling the solar tracker and installing a fixed solar panel in a static way, an operational and comparative performance analysis was carried out between both systems, which came to the conclusion that the panel that uses the monitoring system is more efficient than the system that was installed.

KEYWORD

Solar tracker, radiation, efficiency, solar panels, photovoltaic solar energy

TABLA DE CONTENIDO

SINTESIS	ix
INTRODUCCION	17
PROBLEMA DE INVESTIGACION	19
JUSTIFICACION	20
EJE METODOLOGICO DE LA INVESTIGACION	20
OBJETO INVESTIGATIVO	20
CAMPO DE ACCION	20
HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACION	20
OBJETIVO GENERAL	21
TAREAS DE LA INVESTIGACION	21
DISEÑO METODOLÓGICO	21
CAPITULO I	24
1.Estado del arte	24
1.1 Energías renovables	24
1.2 Energía Solar Fotovoltaica	26
1.3 Células solares de primera generación	27
1.4 Células solares de segunda generación	28
1.5 Células solares de tercera generación	30
1.6 Factores que se deben tomar en cuenta para la instalación de paneles solares.	32
1.6.1 Factores Ambientales.	32
1.6.2 Angulo de inclinación u Orientación del modulo	36
1.7 Seguidor solar	36
1.8 Discusión	38
CAPITULO II	41
2. MATERIALES Y METODOS	41

2.1 Etapa 1. Diseño y construcción de la estructura mecánica para el seguidor solar	41
.....	42
2.2 Etapa 2. Diseño de la parte Electrónica y programación del seguidor solar	51
CAPITULO III	58
3. PROPUESTA	58
3.1 Introducción	58
3.2 Descripción de la propuesta	59
3.3 Alcance de la propuesta	61
3.4 Factibilidad	61
3.4.1 Factibilidad técnica	61
3.4.2 Factibilidad económica	62
3.5 Recursos	62
3.5.1 Recursos humanos	62
3.5.2 Recurso Tecnológicos	63
CAPITULO IV	64
4. APLICACION DE LA PROPUESTA Y EVALUACION DE LOS RESULTADOS	64
4.1 Introducción	64
4.2 Resultados y Discusión	65
4.3 Factibilidad económica	71
BIBLIOGRAFIA	79
ANEXOS	87
Anexo 1. Graficas radiación vs energía y temperatura de ambos sistemas	87
Anexo 2. Código de programación	108
Anexo 3. Presupuesto Sistema solar de 3KW	114
Anexo 4. Tabla precios materiales seguidor solar	116
Anexo 6. Diagrama esquemático de conexión	118

Anexo 7. Análisis financiero	119
---	------------

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 Células solares de primera generación monocristalinos y policristalina</i>	28
<i>Figura 2 Células Solares de Segunda Generación "Película Delgada" (Aguirre, 2008)</i>	29
<i>Figura 3 Células solares de tercera generación (INAOE, 2016)</i>	31
<i>Figura 4 Descomposición de la Radiación (Sengupta et al., 2012)</i>	33
<i>Figura 5 Solsticios y Equinoccios con sus respectivas estaciones del año (Observatorio Astronómico de Quito, 2015)</i>	34
<i>Figura 6 Trayectoria del sol a lo largo del año, en Ecuador, Latitud 0 (Quito) (Lara & Fierro, 2014).</i>	35
<i>Figura 7 El sol se sitúa en su punto máximo CENIT durante los Equinoccios (Lara & Fierro, 2014)</i>	35
<i>Figura 8 Seguidor solar de eje horizontal (SolarFirst, 2016)</i>	37
<i>Figura 9 Seguidor solar Acimut- Latitud (Alvarado et al., 2016)</i>	38
<i>Figura 10 Facultad de Ingeniería Industrial campus universitario ULEAM.</i>	41
<i>Figura 11. Seguidor solar de dos ejes (Los Autores, 2021)</i>	42
<i>Figura 12 Base del seguidor solar de dos ejes (Los Autores, 2021)</i>	43
<i>Figura 13. Diseño mecánico Azimutal (Los autores, 2021)</i>	44
<i>Figura 14 Final de carrera colocado para detener el motor que produce el movimiento azimutal (Los Autores, 2021)</i>	47
<i>Figura 15 Bosquejo del sistema mecánico del seguidor solar con movimiento lineal para que se mantenga firme (Los autores, 2021).</i>	48
<i>Figura 16 Sistema de engranaje por cadena para el movimiento tipo doble inclinación (Los Autores, 2021)</i>	48
<i>Figura 17 Perfil del soporte lateral derecho del panel (Los Autores, 2021)</i>	49
<i>Figura 18 Limitadores eléctricos (Los Autores, 2021)</i>	51
<i>Figura 19 Diagrama de Bloques de la parte electrónica del seguidor solar de dos ejes (Los Autores, 2021)</i>	52
<i>Figura 20 Disposición de los sensores LDR al posicionamiento de la estructura (Los autores, 2021)</i>	54
<i>Figura 21 Diagrama de conexión de sensores de luz y limitadores eléctricos hacia el módulo Arduino</i>	54
<i>Figura 22 Diagrama de conexión de los drivers y los motores a paso con el módulo Arduino Mega 2560 (Los Autores 2021)</i>	55
<i>Figura 23 Diagrama de conexión de los sensores de corriente y las resistencias hacia el Modulo Arduino Mega 2560 (Los Autores, 2021)</i>	55
<i>Figura 24 Diagrama de conexión del Reloj Ds32311 y el modulo micro SD hacia el Arduino Mega 2560 (Los Autores, 2021)</i>	56
<i>Figura 25 Diagrama de todas la conexiones de componente del seguidor solar de dos ejes</i>	56
<i>Figura 26 Diagrama de flujo de la programación del sistema (Los Autores, 2021)</i>	57
<i>Figura 27 Diseño eléctrico del seguidor solar (Los Autores, 2021)</i>	¡Error! Marcador no definido.

<i>Figura 28 Propuesta para el desarrollo de un análisis comparativo entre un seguidor solar de dos ejes y panel fotovoltaico fijo (Los Autores, 2021)</i>	60
<i>Figura 29 Estación Meteorológica ULEAM (Ponce Jara et al., 2020)</i>	61
<i>Figura 30 A la izquierda se encuentra el panel solar con sistema de seguimiento, a la derecha, el panel solar de posición fija y bajo este, la batería y el tablero donde se encuentran los elementos encargados de la recepción de datos. En el centro de ambos sistemas se encuentra la estación Meteorológica (Los autores, 2021)</i>	65
<i>Figura 31 Análisis comparativo general de radiación versus energía de los días que trabajo el seguidor solar de dos ejes y el sistema fijo (Los Autores, 2021)</i>	68
<i>Figura 32 Análisis comparativo de temperatura general diaria promediada del seguidor solar de dos ejes y el sistema fijo. (Los Autores, 2021)</i>	69

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Motor a paso elegido para realizar el movimiento azimutal.</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 2 Motor a paso elegido para realizar el movimiento tipo doble inclinación (Los Autores,2021)</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 3 Sensor LDR y sus principales características.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 4 Factibilidad económica (Los Autores, 2021).....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 5 Recursos Humanos (Los Autores, 2021)</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 6 Recurso Tecnológicos (Los autores, 2021).....</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 7 Analisis de rendimiento diario del sistema seguidor solar de dos ejes, sistema fijo, temperatura y radiación (Los autores, 2021).....</i>	<i>67</i>

INTRODUCCION

El ser humano asume necesidades energéticas para poder realizar tareas como moverse rápido, cocinar, construir casas, calentarse y vestirse, entre otras actividades. La humanidad necesita entonces una estructura industrial establecida sobre fuentes energéticas primarias para poder obtener los servicios necesarios (Correa Alvares et al., 2016). La demanda mundial de energía aumenta significativamente debido al crecimiento de la población y la evolución industrial. Prevenir una crisis energética es uno de los temas más casuales del siglo XXI (Shafiee & Topal, 2009).

Esta situación ha obligado a los investigadores a estudiar las fuentes de energía renovables y la eficiencia energética para los consumos energéticos existentes y la tecnología de energías renovables es una de las soluciones, ya que genera energía transformando fenómenos naturales (o recursos naturales) en formas de energía útil (Diner, 2011).

Existen dos tipos de energías renovables, las convencionales y no convencionales. Dentro de las primeras, la más difundida es la energía hidráulica a gran escala ya que es un recurso natural limitado, mientras que las energías renovables no convencionales surgen como una alternativa limpia, inagotable y amigable con el medio ambiente, estas pueden complementar o sustituir los sistemas actuales de generación de energía que poseen un gran potencial de desarrollo, estas son la geotérmica, eólica, solar, biomasa y la mini hidráulica (Ortúzar, 2013).

La energía solar es la fuente de energía más abundante de energía renovable y el sol la emite a una tasa de 3.8×10^{24} kW, de los cuales aproximadamente 1.8×10^{14} kW es interceptado por la tierra (Kannan & Vakeesan, 2016). Esta energía llega a la tierra en formas de calor y luz, el aprovechamiento de la energía solar puede hacerse por dos vías: térmica y fotovoltaica, la primera utiliza un conjunto de colectores de concentración de distintas formas; el cilindro-parabólico y heliostatos. Mientras que la segunda se realiza mediante paneles solares (Molina Gómez, 2007). No obstante, todas estas tecnologías enfrentan obstáculos de costos requeridas para un sistema de energía completo. Para proporcionar una fuente de energía primaria verdaderamente generalizada, la energía solar debe capturarse, almacenarse y convertirse de manera rentable (Lewis, 2007)

El Programa de Sistema de Energía Fotovoltaica de la Agencia Internacional de Energía (PVPS-IEA) afirma que en los próximos años la energía solar fotovoltaica tiene el potencial de convertirse en la fuente más importante de electricidad a un ritmo extremadamente rápido, actualmente la contribución de la energía fotovoltaica se acerca a un 2,6% de la demanda de electricidad en el mundo (Roca, 2019).

Es importante recalcar que los sistemas fotovoltaicos se instalaban en una posición fija en el pasado, debido a que no existían estudios que determinaran que al estar fijos su eficacia se reduce relativamente dado a que estos no pueden seguir el sol (Fadil et al., n.d.). Debido a esto se vio la necesidad de tener sistemas que permitan mantener una mejor orientación de paneles solares ya que la producción de energía mejora (Dias et al., 2017). No obstante, en la actualidad aún se siguen implementando sistemas fotovoltaicos fijos en diferentes partes del mundo dado a la relación de costos si lo comparamos con sistemas de seguimiento.

Un dato relevante al hablar de sistemas que permiten seguir el sol es que, nuestro planeta está sometido a movimientos de diversa índole, los cuales se definen con referencia al sol, estos movimientos son: Rotación y traslación, sin embargo, para nosotros es el sol quien parece moverse alrededor de la tierra, del Este al oeste. A esto se la denomina movimiento aparente del sol y varía de acuerdo al lugar de observación (latitud y altitud), así como también de la estación climática en la que se encuentre.

En el caso de Ecuador al estar ubicado en la línea ecuatorial o línea equinoccial cuenta con una ubicación privilegiada ya que recibe radiación casi perpendicular. En este contexto mundial y nacional, existe la necesidad de plantear un marco teórico de referencia que permita conocer el comportamiento de paneles fotovoltaicos fijos y paneles con sistemas de seguimiento en la ciudad de Manta, dado a que se carece de estudios realizados. Manta es caracterizada por su clima tropical cálido donde la mayor parte del año posee días despejados, siendo este un factor importante y clave para realizar el estudio antes mencionado. Dicho esto, el presente trabajo de titulación nos permitirá determinar la eficiencia al comparar ambos sistemas fotovoltaicos, dando como resultado el rendimiento máximo de uno de ellos.

PROBLEMA DE INVESTIGACION.

Actualmente en diferentes países del mundo se siguen instalando paneles solares con estructura fija, por lo cual la energía captada que se convierte en electricidad es regularmente ineficiente ya que no ofrece su máximo rendimiento durante todo el día.

Sabemos que la trayectoria del sol a lo largo del año no siempre es la misma en cualquier lugar del planeta, sino que depende de la latitud donde se encuentre el observador y de la estación climática. De esto dependerá la orientación o grados de inclinación que le damos al panel. Otros factores naturales e impredecibles que ocasionan pérdidas en el rendimiento de un sistema fotovoltaico son: El polvo y las partículas generadas por lluvias y vientos.

Con el pasar de los años y gracias a varias investigaciones se ha reportado que posicionar los paneles fotovoltaicos de tal manera que su estructura permita que estos se muevan en forma perpendicular al sol a lo largo del día puede incrementar la producción de energía. El estudio de estrategias de posicionamiento en zonas ecuatoriales es aún muy escaso, y existen pocos estudios de implementación en estas latitudes.

Por lo tanto, el problema general de este estudio se lo describe con base a la siguiente pregunta: ¿Es significativo el aumento de producción de energía entre paneles con sistema de seguidor solar y paneles fijos que compensen la inversión económica en sistemas de seguidores solares en la ciudad de Manta?

JUSTIFICACION

La instalación de paneles solares en nuestro país ha tenido mayor crecimiento en las últimas décadas, con el pasar de los años se han investigado estrategias de posicionamiento de manera que la estructura mecánica de los paneles solares que sigan de manera perpendicular al sol. En la ciudad de Manta no existen estudios realizados sobre esta temática.

Este trabajo aborda el diseño y construcción de un sistema seguidor solar de dos ejes que sea capaz de posicionarse en el punto de máxima irradiación solar durante el día. Esta investigación nos permitirá comprobar si la mejora de producción de energía entre un panel solar estático versus un panel con sistema de seguimiento de dos ejes es significativa y si los costos asociados son compensados por este aumento.

Sabemos que en unos años la energía fotovoltaica tiene el potencial de convertirse en la fuente más importante de electricidad a nivel mundial. Si se logra implementar un proyecto de generación fotovoltaica de gran magnitud en la ciudad antes mencionada, el estudio realizado podría ser tomado en cuenta para determinar si los costos de los seguidores solares a mediano y largo plazo compensan al sustituirlos por sistema fotovoltaicos fijos.

EJE METODOLOGICO DE LA INVESTIGACION

OBJETO INVESTIGATIVO

El análisis comparativo técnico-económico entre un panel fotovoltaico fijo y un seguidor solar de dos ejes.

CAMPO DE ACCION

Estudios realizados en la ciudad de Manta sobre Sistemas de seguimientos de dos Ejes

HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACION

El rendimiento de un panel solar instalado de manera estática y el de un panel solar con sistema de seguimiento de dos ejes varía desde un 5% a un 25% a favor del sistema con seguimiento.

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un análisis comparativo técnico-económico entre paneles solares estáticos y paneles con sistema de seguimiento de dos ejes instalados en la ciudad de Manta-Uleam

TAREAS DE LA INVESTIGACION

Tarea 1: Identificar la estructura y los factores que inciden en el funcionamiento de los paneles solares estáticos y paneles con sistema de seguidor solar.

Tarea 2: Diseñar, instalar y montar un sistema seguidor solar de dos ejes y un sistema solar estático de similares características.

Tarea 3: Obtener una base de datos de corriente, tensión y temperatura de módulo generado por un panel solar estático y un panel con sistema de seguidor solar de dos ejes de iguales características bajo las mismas condiciones e intervalos de tiempo.

Tarea 4: Comparar y determinar el comportamiento de ambos sistemas solares en función de producción de energía, radiación y temperatura.

Tarea 5: Determinar la viabilidad técnica-económica de un sistema solar fijo vs uno móvil en la ciudad de Manta.

DISEÑO METODOLÓGICO

La presente tesis se va a desarrollar utilizando los siguientes tipos de investigación:

Investigación bibliográfica. – Consiste en la búsqueda, recopilación, organización, valoración, crítica e información de datos bibliográficos de artículos y otros textos en su mayoría científicos relacionados con la temática planteada.

Investigación experimental. – La investigación experimental está integrada por un conjunto de actividades metódicas y técnicas que se realizan para recabar la información y datos necesarios sobre el tema a investigar y el problema a resolver, se presenta mediante la manipulación de una variable experimental no comprobada, en condiciones rigurosamente controladas, con el fin de describir de qué modo o por que causa se produce una situación o acontecimiento particular.

Investigación de campo. – Es el proceso que permite obtener datos de la realidad y estudiarlos tal y como se presentan, sin manipular las variables. Existen varios

tipos de investigación de campo, según el objetivo del estudio. Pueden ser investigaciones para explorar un fenómeno nuevo o del que se ha estudiado muy poco. También se pueden hacer investigación de campo para describir o comparar variables.

Método analítico-sintético. –Consiste en la desmembración de un todo, primero se separan los elementos que intervienen en la realización de un fenómeno determinado, para observar las causas, la naturaleza y los efectos, después se reúnen los elementos que tienen relación lógica entre sí (como en un rompecabezas) hasta completar y demostrar la verdad del conocimiento. Para posteriormente relacionar cada reacción mediante la elaboración de una síntesis general del fenómeno estudiado.

Método Inductivo-deductivo. – Comprende estrategias de razonamiento lógico, siendo que el inductivo utiliza premisas particulares para llegar a una conclusión general, y el deductivo usa principios generales para llegar a una conclusión específica. Con relación al tema propuesto y en base a los tipos de investigación que se van a realizar, este método nos permitirá observar los hechos, demostrar que posiblemente se puede generar nuevos conocimientos, razonar y explicar la realidad siempre y cuando se parta de las investigaciones realizadas con anterioridad.

Esta investigación se encamina en recopilar información de estudios realizados en diferentes países del mundo acerca de los sistemas solares de seguimiento, así como también de sistemas fotovoltaicos fijos, es indispensable ejecutar una búsqueda profunda sobre los factores que inciden para el funcionamiento de los mismos, así como también los resultados expuestos en lo que va de la última década.

En el presente trabajo de titulación se diseñará e instalará un seguidor solar de dos ejes y a unos metros de distancia se colocará un panel fijo. Lo que se pretende con ambos sistemas es realizar un análisis comparativo técnico-económico para determinar si los costos de producción compensan el rendimiento de energía obtenida por el seguidor solar.

Para la recopilación de datos se colocarán sensores de corriente, de voltaje y de temperatura, ambos paneles trabajarán en el mismo lugar y bajo las mismas condiciones. Es necesario mencionar que los datos serán recopilados por un tiempo de treinta días,

después se procederá a mostrar el comportamiento diario de ambos paneles y demostrar cuál de los dos es más eficiente. Además, se usarán los datos de radiación solar registrados por la estación meteorológica que funciona dentro de los predios de la ULEAM y que forma parte del proyecto de investigación “Análisis de los recursos energéticos de los cantones Manta, Montecristi y Jaramijo, con fines de generación eléctrica”.

CAPITULO I

1.Estado del arte

Este capítulo recopilará la información necesaria de artículos, tesis, reportes, informes, documentación y material de contenido científico que nos permitirá adentrarnos al tema que vamos a tratar, así como también conocer los estudios ya realizados con anterioridad en diferentes partes del mundo.

1.1 Energías renovables

La contaminación atmosférica asociada con la producción y el uso de energía (la quema de combustible en los hogares y la quema de desechos, las centrales eléctricas y las actividades industriales) afecta directamente la calidad de aire local y del clima mundial, las temperaturas de la superficie de tierra siguen cambiando, la distribución de las precipitaciones se está modificando, el hielo y la nieve se están derritiendo y el nivel del mar está subiendo al igual que la temperatura de los océanos, la mayor parte de este calentamiento se ha producido en los últimos 30 años (Arroyo & Luis, 2019).

Es por esta razón que en las últimas décadas las energías renovables han tenido un progreso formidable, llegando a acontecer una participación significativa en el mercado energético mundial con posibilidades de convertirse en el principal recurso primario de energía en mediano plazo sustituyendo a los combustibles fósiles. Las fuentes renovables son muy poco contaminantes, sostenibles y económicos, y su aprovechamiento implica beneficio sociales y económicos, sin embargo, sus costos de generación experimentan una disminución continua debido a que las tecnologías siguen siendo una condición imprescindible para conseguir la popularización de las tecnologías renovables, esto hace que no sean competitivos aun con los combustibles fósiles (Posso et al., 2014).

La energía solar es uno de los recursos más eficaces que se pueden utilizar (Fadil et al., 2013). La mayoría de las energías renovables se deriva directamente o indirectamente desde el sol. Se puede usar la energía solar de forma directa para calentar e iluminar los edificios, para generar electricidad, para calentar el agua y una variedad de usos comerciales e industriales. El calor del sol también dinamiza los vientos cuya energía se captura por las turbinas del viento. El viento y el calor del sol ocasionan la evaporación del agua, cuando éste vapor se convierte en lluvia o nieve fluye hacia los ríos o corrientes del agua y se puede capturar su energía por medio de energía hidroeléctrica. Junto con la

lluvia y la nieve, el sol también causa el crecimiento de las plantas la materia orgánica de las plantas se denomina biomasa, la cual se puede usar para producir electricidad, combustible para la transportación o productos químicos, el uso de la biomasa para cualquier de éstos fines se denomina la bioenergía. El hidrógeno es el elemento más abundante el planeta tierra y se encuentra en muchos compuestos orgánicos y también en el agua, sin embargo, no ocurre de forma natural como gas, siempre se encuentra en combinación con otros elementos, como por ejemplo el oxígeno para producir el agua. Una vez separado de otros elementos, se puede quemar el hidrógeno como el combustible y convertirlo en electricidad. No todas las fuentes de la energía renovable proceden del sol, la energía geotérmica es el calor interno de la tierra que se puede usar para varios fines como, por ejemplo, la producción de electricidad, calentar y enfriar los edificios. Por otra parte, las energías de las olas del mar constituyen otra fuente de la energía renovable. En adición la energía de las olas, hay también energía derivada tanto de las olas como los vientos. El sol también calienta la superficie del océano más que la profundidad creando una temperatura diferencial la cual se puede utilizarse como una fuente de energía. Todas estas formas de energía oceánica se pueden usar para producir electricidad (Badii et al., 2016).

Una tercera parte de la capacidad de potencia eléctrica global proviene actualmente de energías renovables. El informe Estadísticas de Capacidad Renovable 2019 de IRENA (International Renewable Energy Agency), uno de los más completos y actualizados en este campo, concluye que la capacidad renovable ha crecido en todas las regiones del mundo, aunque a distinto ritmo. Mientras que Asia representó el 61 por ciento del total de nuevas instalaciones de energía renovable, Oceanía fue la región de más rápido crecimiento con un 17,7 por ciento, seguida por Asia con un 11,4 por ciento y África con un 8,4 por ciento en 2018. Cerca de dos terceras partes del total de nueva capacidad de generación de energía agregada en 2018 provino de fuentes renovables (IRENA, 2019).

De acuerdo a datos del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), Latinoamérica ya es la región más verde del mundo en cuanto a generación de energía: el 60% de su consumo eléctrico proviene de fuentes renovables (principalmente, hidráulicas), mientras que la media global no supera el 25% (Díaz et al., 2017).

Como ya se mencionó en apartados anteriores la energía solar es una fuente de energía limpia e inagotable. Casi toda la energía de que disponemos proviene del Sol. Él es la

causa de los vientos, de la evaporación de las aguas superficiales, de la formación de nubes, de las lluvias. Su calor y su luz son la base de numerosas reacciones químicas indispensables para el desarrollo de los vegetales y de los animales por ende se ha centrado este trabajo de investigación en este tipo de energía ya que además de ser muy prometedora es investigada a nivel mundial para poder captarla de manera eficiente.

1.2 Energía Solar Fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es una fuente de energía que produce electricidad de origen renovable obtenida directamente a partir de la radiación solar mediante un dispositivo semiconductor denominado célula fotovoltaica, o bien mediante una deposición de metales sobre un sustrato denominada célula solar de película fina (Aguilar et al., 2016).

La célula solar produce tanto una corriente como un voltaje para generar energía eléctrica. Este proceso requiere de un material en el que la absorción de luz eleve un electrón a un estado de mayor energía y el movimiento de este electrón de mayor energía desde la célula solar a un circuito externo. El electrón luego disipa su energía en el circuito externo y regresa a la celda solar (Mohammad Bagher et al., 2015).

Las células solares tradicionales recolectan solo una parte de la energía electromagnética que llega a la superficie de la Tierra y responden a muchas de las mismas longitudes de onda detectadas por el ojo humano (750 nm - 400 nm). Se descubrió que las longitudes de onda tienen poca energía para producir electricidad y en la longitud de onda ultravioleta simplemente crean calor, reduciendo la eficiencia de la célula (Papiewski, 2018)

Dicho comportamiento hace énfasis a la principal tecnología de células solares disponibles en la actualidad, estas están fabricados de una gran variedad distintas de material semiconductor. Estos materiales deben tener ciertas características para poder absorber la luz solar (Bèer, 2002). Sin embargo, todos los materiales con los que se fabrican las células solares dependen de una propiedad inherente llamada *Bangap*, que es: la distancia entre la banda de valencia de los electrones y la banda de conducción, además, representa la energía mínima que se requiere para excitar un electrón hasta el estado en la banda de conducción (Hanania & Stenhouse, 2015).

Por lo tanto, una célula solar solo puede absorber fotones con energía mayor que la banda prohibida; reducir la banda prohibida conducirá a una corriente más grande y excitará una célula solar con fotones que contienen mucha más energía que la banda prohibida y rápidamente disiparán su exceso de energía en forma de calor. Por lo tanto, la salida de corriente y voltaje de una celda solar no se puede maximizar simultáneamente (MIT, 2015)

Los semiconductores más comunes y sus bandgaps son: silicio (Si) (1,11 eV), telururo de cadmio (CdTe) (1,44 eV), arseniuro de galio (GaAs) (1,43 eV) y diselenuro de galio e indio de cobre (CIS y CIGS) (1,00 - 1,7 eV) (Tinoco et al., 1991) (Kittel, 2005) (Niv et al., 2012). La eficiencia de conversión óptima (OCE) se encuentra entre una banda prohibida de 1,1 a 1,5 eV; a partir de los materiales anteriores, GaAs contiene el OCE con una banda prohibida bien adaptada al espectro solar, en el que la luz solar se convierte en electricidad (Niv et al., 2012).

Las células solares se pueden clasificar tres categorías de generación: Células de primera generación, segunda generación y tercera generación. (Maehlum, 2015).

1.3 Células solares de primera generación

Son las antiguas células solares conocidas como células solares convencionales-tradicionales o basadas en obleas, hechas de materiales de silicio cristalino (c-Si) (Maehlum, 2015).

La tecnología basada en obleas de silicio se clasifica además en dos subcategorías denominados: Célula solar de silicio monocristalino simple (Sc-Si) y Célula solar de silicio policristalino (Poly-Si o Mc-Si) (Mohanta et al., 2015). La eficiencia de las células solares de silicio monocristalino (Sc-Si) se sitúa entre el 24.7%, Sin embargo, las células policristalinas son consideradas inferiores con una eficiencia del 19,3% (Maehlum, 2015). La diferencia entre eficiencia se da debido a calidad de materiales con las que son fabricadas cada una, la célula solar de silicio monocristalino (sc-Si) tiene una mayor calidad de cristal y requiere obleas más caras (entre un 20% y un 30%) en comparación con la celda solar silicio policristalino (poly-Si o mc-Si)(MIT, 2015). Ver Figura 1

Monocrystalina

Policristalina



Figura 1 Células solares de primera generación monocristalinos y policristalina

Tomado de: <https://www.ingmecafenix.com/como-funciona/paneles-solares/>

1.4 Células solares de segunda generación

Son denominadas células de película delgada y Silicio amorfo (A-Si), utilizan menos silicio en comparación con las células solares de silicio mono, policristalino, son flexibles y resistentes a la abrasión que los paneles tradicionales hechos de obleas sólidas de silicio (Deng & Schiff, 2003). Las células de obleas de silicio tienen capas absorbentes de luz de hasta 350 μm de espesor, mientras que las células solares de película delgada tienen capas absorbentes de luz muy delgadas, generalmente del orden de 1 μm de espesor (Chopra et al., 2004). Estas tecnologías tienen potencial para enfrentar los desafíos científicos y lograr una alta eficiencia con mayor durabilidad. Además, exhiben menores costos de fabricación (Deng & Schiff, 2003). Dentro del grupo de células solares de segunda generación encontramos las siguientes células cuyo nombre dependen del material con el que están fabricados: Células de Silicio Amorfo (A-Si), Células de Teluro de Cadmio (CdTe), células CIGS (di-seleniuro de cobre, indio, galio). Ver figura 2.

Células de Silicio Amorfo (A-Si) La palabra "amorfa" con respecto a la célula solar significa que el material de silicio que comprende la célula carece de una disposición definida de átomos en la red, estructura no cristalina o no muy estructurada. Estos se fabrican recubriendo el material de silicio dopado en la parte posterior del sustrato / placa de vidrio (Mohammad Bagher et al., 2015).

Células solares de teluro de cadmio de película delgada (CdTe) El diseño se basa en lo que se denomina una configuración de sustrato, dentro del cual son depositados materiales activos, que a su vez actúan como una ventana transparente que logra permitir la radiación solar, la cual incide directamente dentro del dispositivo. Es importante

destacar que el telurio de cadmio (CdTe) se cataloga dentro del ámbito científico como un material prometedor para la obtención de altas eficiencias y bajo costo mediante su aplicación en las células solares de películas delgadas. Considerando las diferentes técnicas de fabricación de las películas delgadas policristalinas de CdTe, se reportan eficiencias que rondan el 15,8% y el 22,1% según los diferentes estudios (Martin, 2016)

Sin embargo, existen varios problemas ambientales con el componente de cadmio de la celda solar. El cadmio se considera un metal pesado y un agente tóxico potencial que puede acumularse en el cuerpo humano, los animales y las plantas. La eliminación de los materiales tóxicos a base de Cd, así como su reciclaje, puede ser muy costoso y perjudicial también para nuestro medio ambiente y la sociedad (Mohammad Bagher et al., 2015).

Por lo tanto, un suministro limitado de cadmio y los peligros ambientales asociados con su uso son los principales problemas de esta tecnología CdTe (Badawy, 2015).

Células solares de cobre, indio, galio, di-seleniuro (CIGS) Los CIGS también son semiconductores del tipo de banda prohibida directa. En comparación con la celda solar de película delgada CdTe, los CIGS tienen una eficiencia más alta ~ 10% - 12%. Debido a su eficiencia y economía significativamente altas, la tecnología de células solares basada en CIGS forma una de las tecnologías de película delgada más probables. El procesamiento de CIGS se realiza mediante las siguientes técnicas: pulverización catódica, evaporación, técnica de recubrimiento electroquímico, impresión y deposición por haz de electrones (Sharma et al., 2015)

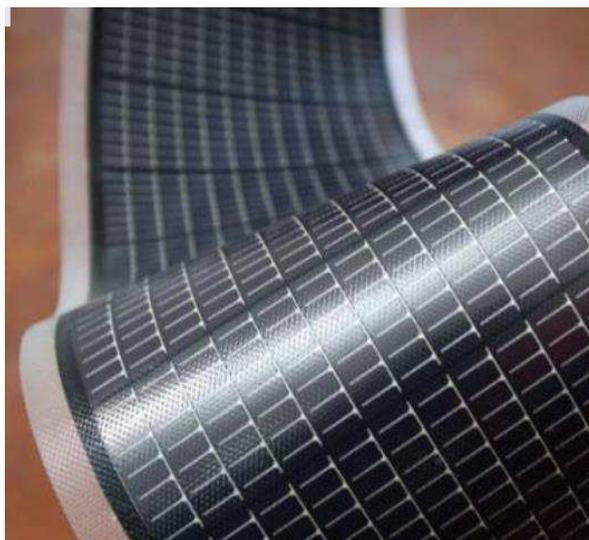


Figura 2 Células Solares de Segunda Generación "Película Delgada" (Aguirre, 2008)

1.5 Células solares de tercera generación

Son las nuevas tecnologías prometedoras, pero no se investigan comercialmente en detalle. También llamadas células de película delgada emergente (Mohammad Bagher et al., 2015). Existen principalmente 4 tipos: Célula Perovskita, Célula PV orgánica (OPV), Célula solares sensibilizadas con colorante (DSSSC), célula Punto cuántico (QD) y célula solar multifunción (MF). Ver figura 3.

Célula Perovskita son una clase de compuestos definidos por la fórmula ABX_3 donde X representa un halógeno como Yodo (I), Bromo (Br), Cloro (Cl). Y A y B son cationes de diferente tamaño. Las células solares basadas en perovskitas pueden tener una eficiencia de hasta el 31% (Shi et al., 2015). Sin embargo, los problemas actuales con las células solares de perovskita son su estabilidad y durabilidad. El material se degrada con el tiempo y, por lo tanto, disminuye la eficiencia general. Por ende, se necesita más investigación para llevar estas células al mercado (Mohammad Bagher et al., 2015).

Célula PV orgánica (OPV) Las PV orgánicas se caracterizan por el uso de materiales orgánicos como moléculas o polímeros y por lo tanto estos se asocian a materiales bajos costos, bajos costos de fabricación y flexibilidad de la celda, adaptabilidad, lo que podría conducir a una nueva gama de aplicaciones. Las células OPV tomaron su nombre del uso de material semiconductor a base de carbono, que en su mayoría son elementos abundantes en la Tierra y se pueden ensamblar en películas delgadas mediante métodos de deposición de alto rendimiento en áreas grandes. Las OPV se clasifican en dos clases: células OPV de molécula pequeña y células OPV basadas en polímeros. OPV ha logrado una eficiencia del 11,5%, pero las limitaciones de eficiencia y la confiabilidad a largo plazo siguen siendo barreras importantes (NREL, 2017b) (Eficiencia energética y energías renovables de EE. UU, 2017).

Célula solar sensibilizadas con colorante (DSSSC) son tecnología híbrida orgánico-inorgánica que utiliza tintes absorbentes de moléculas pequeñas. La novedad en las células solares DSSC surge debido a la fotosensibilización de los recubrimientos de TiO_2 nanogranados junto con los colorantes ópticamente activos visibles, aumentando así las eficiencias superiores al 10% (Li et al., 2006).

Célula Punto cuántico (QD) es un diseño de célula solar que utiliza puntos cuánticos como material fotovoltaico absorbente. Intenta reemplazar materiales a granel como el

silicio, el seleniuro de cobre, indio, galio (CIGS) o CdTe (Baskoutas & Terzis, 2006). Las ventajas clave de esta clase de material incluyen la capacidad de ajustar su banda prohibida y el potencial de celdas multifuncionales utilizando un sistema de material único. La eficiencia del laboratorio ha alcanzado el 10,6% (NREL, 2017).

Célula solar multifunción (MF) Son células solares con múltiples uniones p – n hechas de diferentes materiales semiconductores. El rendimiento es superior al 43%. Sin embargo, esta eficiencia se obtiene a costa de una mayor complejidad y precio de fabricación. Hasta la fecha, su precio más alto y su relación precio-rendimiento más alta han limitado su uso a roles especiales, especialmente en la industria aeroespacial, donde es deseable su alta relación potencia-peso (Mohammad Bagher et al., 2015).

Ahora, ya que se conocieron los diferentes tipos de células solares es necesario mencionar que la presente investigación está orientada en trabajar con células solares de silicio monocristino ya que resulta ser más eficiente que las células de silicio policristalina.

Es importante recalcar que: las células solares son los componentes básicos de los módulos fotovoltaicos, también conocidos como paneles solares (Mohammad Bagher et al., 2015). Actualmente los paneles solares monocristalinos y policristalinos son los que lideran el mercado de la tecnología fotovoltaica para instalaciones residenciales y muchas veces son instalados en industrias.



Figura 3 Células solares de tercera generación (INAOE, 2016)

1.6 Factores que se deben tomar en cuenta para la instalación de paneles solares.

Al instalar paneles solares buscamos que el rendimiento de los mismos sea el óptimo, más sin embargo este, no solo depende de los materiales de fabricación, también existen algunos factores importantes que se deben tener en cuenta para que la captación de energía solar sea eficiente. Los factores que más relevancia tienen son los factores ambientales y ángulo de inclinación u orientación de los paneles.

1.6.1 Factores Ambientales.

Existen varios factores ambientales que se deben recalcar y estudiar para sacar el máximo provecho al instalar un sistema solar como: irradiancia solar y sombras

Irradiancia Solar o Radiación Solar

La cantidad de energía proveniente de la fuente solar por unidad de área se conoce como irradiancia. Al llegar a la atmósfera terrestre, la radiación solar es modificada (dispersada) por la interacción con los componentes allí presentes, como son el ozono, oxígeno, dióxido de carbono y vapor de agua, ya que tienen una absorción significativa en varias bandas espectrales específicas. Además, las gotas de agua y el polvo suspendido también causan dispersión y como resultado de todas estas interacciones se produce una descomposición de la radiación solar incidente como se muestra en la Figura 4 (Sengupta et al., 2012).

La irradiación solar incidente en una superficie consta de radiación directa, difusa, y radiaciones reflejadas. La mayor fracción de la irradiación solar es el componente directo; sin embargo, tanto la radiación difusa como la reflejada debe tenerse en cuenta durante el análisis del funcionamiento del sistema. La irradiación solar en los módulos fotovoltaicos varía dependiendo de la posición en la que se encuentra el módulo; la irradiación solar máxima se produce cuando los módulos son perpendiculares a la radiación directa (Mehrtash et al., 2012).

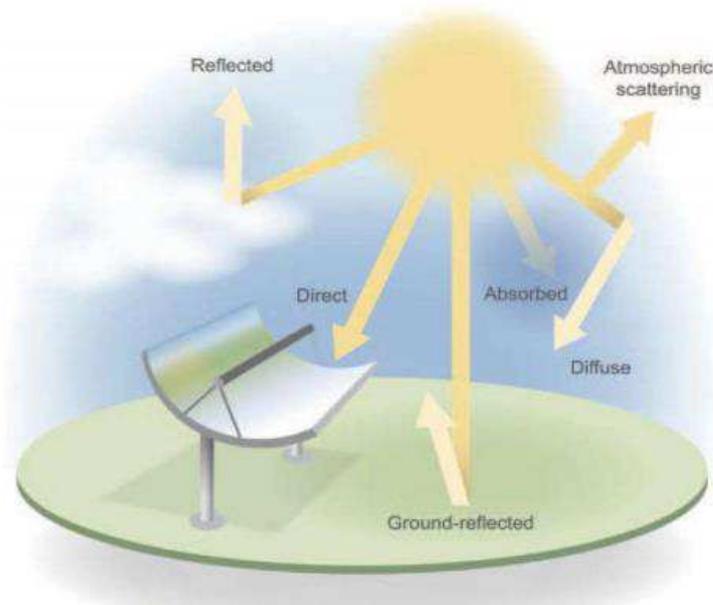


Figura 4 Descomposición de la Radiación (Sengupta et al., 2012)

La irradiancia generalmente actúa según el clima y la ubicación del sol en el cielo (Mondol et al., 2007). Sabemos que la tierra ejerce el movimiento de traslación (en un periodo de 365 días y aproximadamente unas 6 horas) donde la Tierra gira alrededor del sol con una órbita elíptica, no circular en ella no se puede definir un radio, sino dos ejes, uno mayor y otro menor, de tal manera que dos veces al año la Tierra pasa por los extremos del eje mayor, y otras dos veces por los del eje menor, lo que provoca cambios de temperatura, clima y duración del día y la noche. Dando como resultado dos fenómenos denominados solsticios y equinoccios. Y estos a su vez determinan las estaciones del año (primavera, verano, otoño e invierno). Sin embargo, es importante recalcar que no en todos los países se dan las cuatro estaciones como se observa en la figura 5.

Ecuador por estar ubicado sobre la línea ecuatorial (ambos hemisferios, latitud 0°) posee un clima tropical, sin embargo, cada región del territorio ecuatoriano posee microclimas influidos por la situación geográfica en la que se encuentra ubicada cada provincia del país. No existen las cuatro estaciones como ocurren en otras latitudes del planeta, en cambio, se distinguen dos periodos climáticos invierno y verano.

Nuestro país recibe los rayos del sol de manera perpendicular por ello la cantidad y potencia de radiación que llega a nuestra región es la más alta en todo el planeta. La luz solar a medida que llega a los polos va disminuyendo en su intensidad; por el contrario,

ésta impacta con más fuerza sobre la línea ecuatorial, nuestra posición geográfica hace que la luz solar pase por menos atmósfera, y aquí la radiación cae perpendicularmente, esto no ocurre en otros lugares del planeta en donde el ángulo de incidencia de la luz solar varía de acuerdo con las diferentes estaciones del año. (Agencia Espacial Civil Ecuatoriana. EXA, 2008).

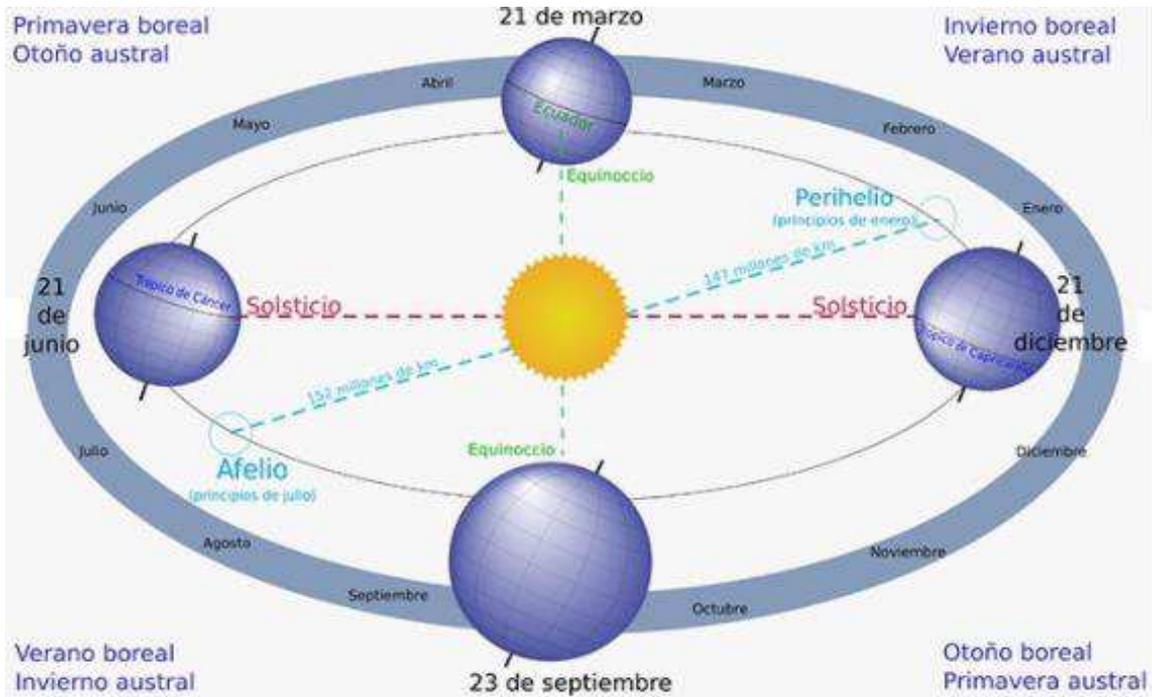


Figura 5 Solsticios y Equinoccios con sus respectivas estaciones del año (Observatorio Astronómico de Quito, 2015)

La ubicación del sol cambia a lo largo del año, este realiza su recorrido por una bóveda celeste, de la cual nosotros somos el centro (Ver figura 6). Depende mucho del lugar de observación (longitud y latitud). Durante los Equinoccios en Ecuador el sol se sitúa en el cenit del medio día (Ver figura 7). Mientras que los solsticios en Ecuador el sol no alcanzaría el Cenit sobre el Sur a mediodía (Mondol et al., 2007). Ver figura 6.

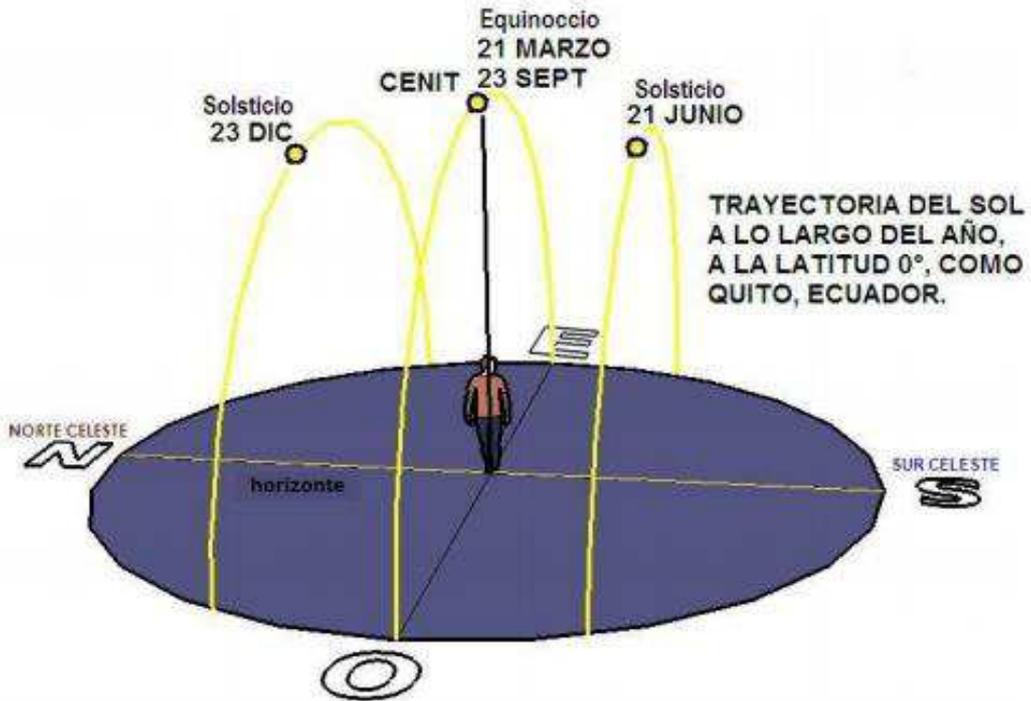


Figura 6 Trayectoria del sol a lo largo del año, en Ecuador, Latitud 0 (Quito) (Lara & Fierro, 2014).

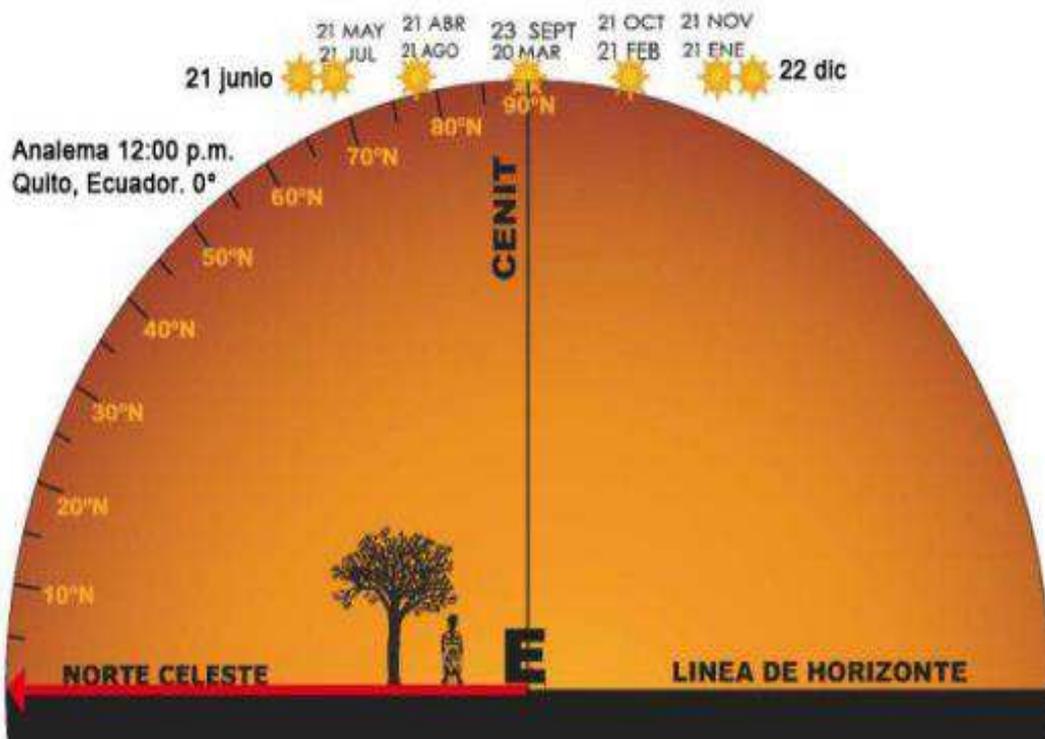


Figura 7 El sol se sitúa en su punto máximo CENIT durante los Equinoccios (Lara & Fierro, 2014)

Sombras

Las sombras son unos de los mayores enemigos que podemos encontrarnos a la hora de instalar placas solares. Es necesario tener en cuenta que las sombras que se generan, pueden ser causadas por postes, árboles y edificios y también pueden ser causadas por las estructuras de montaje del módulo en otras estructuras (Louis et al., 2016).

1.6.2 Angulo de inclinación u Orientación del modulo

La producción de energía diaria, mensual y anual de los paneles fotovoltaicos es fuertemente influenciada por la orientación del módulo. Hay algunas ópticas pérdidas que varían con el ángulo de incidencia (AOI) de la luz del sol al módulo. El componente directo de la irradiancia solar se ve afectado por la AOI mientras que el componente difuso es casi independiente del módulo orientación (Mondol et al., 2007).

Si los paneles son instalados en un ángulo de inclinación fijo, entonces el ángulo de inclinación debe ser el mismo que la latitud del lugar de instalación. El ángulo de inclinación se desvía aproximadamente $+15^\circ$ del ángulo de latitud en invierno y aproximadamente -15° del ángulo de latitud en verano. Sin embargo, la desviación de los grados no funciona bien en las latitudes superiores a 45° . Por ende, el ángulo de inclinación de los paneles fotovoltaicos depende de la ubicación y, por lo tanto, es específico del sitio (Viitanen & Halonen, 2014)

Ecuador se sitúa en la latitud 0, sin embargo, se recomienda instalar los paneles solares con un ángulo de inclinación mínimo que varía de 5° a 15° , esto va de acorde a la ciudad en la que se desea instalar, ya que se toma como referencia latitud 0° la ciudad de Quito (Mitad del mundo). En el resto de ciudades la latitud varia, por ende, este factor es primordial ya que es el que se toma en cuenta al momento de dar la inclinación correcta al panel solar.

1.7 Seguidor solar

El seguidor solar es un aparato tecnológico, cuya función es aumentar la producción de energía utilizando paneles fotovoltaicos y otros dispositivos de concentración por medio de sistemas mecánicos, eléctricos y electrónicos que siguen la trayectoria del Sol como lo haría un girasol, capturando de esta manera la máxima radiación solar durante el mayor tiempo posible (Flores et al., 2014). La estructura en la que se coloca el módulo está hecha para seguir el sol y los rayos del mismo inciden de manera perpendicular en lo que

va del día, la obtención de energía aumenta haciendo que el módulo fotovoltaico tenga un rendimiento energético óptimo (Verma & Singhal, 2015). Los sistemas fotovoltaicos con seguimiento se pueden dividir en sistemas de seguimiento de un eje, o sistemas de seguimiento de dos ejes. A continuación, se explican los diferentes tipos de seguidores en función del diseño mecánico y el algoritmo utilizado.

Seguidor solar según el tipo de diseño mecánico.

Seguidor solar de un solo eje horizontal. Tiene el eje horizontal respecto al suelo. En este caso, el eje horizontal está orientado Norte-Sur, y a lo largo del día los paneles horizontales girarán sobre este eje, siguiendo el movimiento aparente del Sol. Este tipo de seguidor es aceptable en latitudes cercanas al ecuador (Guardado & Rivera, 2012). Ver figura 8.



Figura 8 Seguidor solar de eje horizontal (SolarFirst, 2016)

Un sistema seguidor de dos ejes puede seguir tanto el acimut como la altitud del Sol y puede ser más eficiente que un sistema de un solo eje (Koussa et al., 2011). Dentro de estos seguidores encontramos una subcategoría.

Seguidor de Acimut-Altitud. Este tipo de seguidor tiene su eje primario vertical respecto al suelo. El eje secundario es perpendicular al primario. Este tipo de seguidor de dos ejes es el más implementado debido a su sencillez en la estructura, además que no requiere estar a gran altura por sobre el suelo; esto es especialmente importante en el caso de tratarse de grandes instalaciones. Este tipo de seguidor ubica a los paneles solares frente al Sol girando alrededor de su eje vertical un ángulo conocido como Acimut, y elevando la inclinación de los paneles a la Altitud a la que se encuentra el Sol (Guardado & Rivera, 2012). Ver Figura 9.



Figura 9 Seguidor solar Acimut- Latitud (Alvarado et al., 2016)

Seguidor solar según el tipo de algoritmo de seguimiento

Seguidores por punto luminoso Poseen un sensor que les indica cual es el punto del cielo más luminoso y al que deben apuntar. El algoritmo de este tipo de seguidor basa su funcionamiento en la señal integrada por uno o varios sensores, dependiendo de dicha señal se envía un comando de control a uno o varios motores para que se posicionen en el punto más adecuado de luminosidad (Alvarado et al., 2016).

Seguidores con programación astronómica Estos mediante un programa conocen en qué punto debería estar el Sol a cada hora y apuntan a dicha posición. Presenta una total independencia de las condiciones climáticas ya que su algoritmo no requiere de sensores que indiquen cual es el punto más luminoso. El seguimiento en este caso depende únicamente de una serie de ecuaciones que predicen la ubicación del Sol en cualquier momento (Alvarado et al., 2016).

1.8 Discusión

En secciones anteriores se comentó que existen varios tipos de células solares. Sin embargo, las más utilizadas en la industria fotovoltaica para la obtención de energía solar y el uso tanto domestico como industrial son las células de silicio monocristalino y las policristalino debido a que el costo de producción es relativamente económico al compararlos con las demás células. No obstante, si hablamos de eficiencia se considera que las células solares monocristalinas son más eficaces que las células policristalinas.

Considerando que existen células solares superiores en rendimiento y eficiencia a las que comúnmente lideran el mercado, se estima que las investigaciones para las mismas sigan su curso y pretender que en unos años la captación y producción de energía solar fotovoltaica tenga menos pérdidas y los costos de producción se compensen. Aun así, es importante determinar la existencia de diversos factores que influyen al momento de instalar paneles solares, debido a que la captación y producción de energía solar en Ecuador no es la misma a la de Rusia, ya que los rayos del sol inciden de una manera diferente en distintas partes del mundo, esto se debe a que la tierra realiza el movimiento de rotación (24 horas) y traslación (365 días, lo que ocasiona cuatro estaciones al año: invierno, verano, otoño y primavera). Por otra parte, es importante recalcar que la tierra posee una inclinación lo que da origen a las latitudes.

Instalar paneles solares es todo un reto aun, debido a que se busca la optimización de este; no todos los países del mundo poseen las cuatro estaciones del año. Los países que tienen las cuatro estaciones son aquellos que se ubican geográficamente sobre los trópicos de cáncer en el hemisferio norte (latitud $23^{\circ} 11' 7''$) y o debajo del trópico de capricornio en el hemisferio sur (latitud $23^{\circ} 26' 14''$). Entonces ¿Será eficiente instalar paneles solares en países donde nieva en el invierno? ¿De qué manera se optimiza la captación de energía si los paneles solares se llenan de nieve? ¿Hay que limpiarlos continuamente? ¿A qué posición en grados se deben colocar? Por otra parte, en países como Ecuador donde solo existen dos estaciones climáticas y donde los rayos del sol inciden de manera perpendicular ya que se encuentra ubicado en la línea ecuador latitud 0° , debido a esto surgen las siguientes interrogantes ¿Es eficiente la instalación de paneles solares en este país o países que se encuentran cerca de la línea equinoccial o línea Ecuador? ¿A qué posición en grados se deben ubicar? ¿La producción de energía en estos países es igual a los países donde existen las cuatro estaciones?

A medida que pasa el tiempo y la tecnología avanza, personas que se dedican a estudiar esta manera de producción de energía han llegado a la conclusión de desarrollar sistemas que sigan la trayectoria del sol, así los países que se encuentran alejados de la zona ecuatorial optimizarían la producción de energía solar captada por paneles solares. Pues bien, con la implantación de estos sistemas se pretende determinar si la eficiencia aumenta al compararlo con un panel fotovoltaico instalado en una posición fija. Entonces si comparamos un panel instalado en una posición fija versus un seguidor solar ubicados en

países en los que pasa la línea equinoccial o línea ecuador ¿Existirá una diferencia significativa de producción de energía?

En apartados anteriores se menciona que los sistemas que siguen el sol pueden ser tanto como de uno y dos ejes dependiendo del diseño mecánico, o seguidores con programación astronómica y seguidores por punto luminosos dependiendo de su algoritmo de seguimiento. Entre estos últimos el más recomendado son los seguidores por punto luminosos ya que funcionan mediante sensores y motores, mientras que los seguidores con programación astronómica dependen de una serie de ecuaciones que predicen la ubicación del sol en cualquier momento, resulta ser de gran precisión, pero su algoritmo de programación representa un alto grado de complejidad.

Para finalizar con este punto se considera importante mencionar que antes de colocar sistemas con paneles solares es necesario realizar un estudio previo tomando en consideración los ítems mencionados con anterioridad.

CAPITULO II

2. MATERIALES Y METODOS

Considerando los diferentes estudios presentados en el marco teórico sobre sistemas de seguidores solares de uno y dos ejes, se ha determinado que existe una variación de rendimiento, debido a que los seguidores solares de un eje está orientado Norte-Sur mientras que el seguidor solar de dos ejes sigue el sol tanto Azimut-Altitud. Es por esta razón que en la presente investigación se decidió enfocarnos en los seguidores solares de dos ejes.

Dentro del presente capítulo se detalla el proceso de construcción un sistema seguidor solar de dos ejes, así como también los materiales a utilizarse para dichos procesos. Cabe resaltar que el sistema será ubicado en la azotea del edificio de la facultad de Ingeniería Industrial, la misma que forma parte del campus universitario ULEAM. Ver figura 1.

Este capítulo se divide en dos etapas: etapa del diseño y construcción, etapa del diseño electrónico y programación

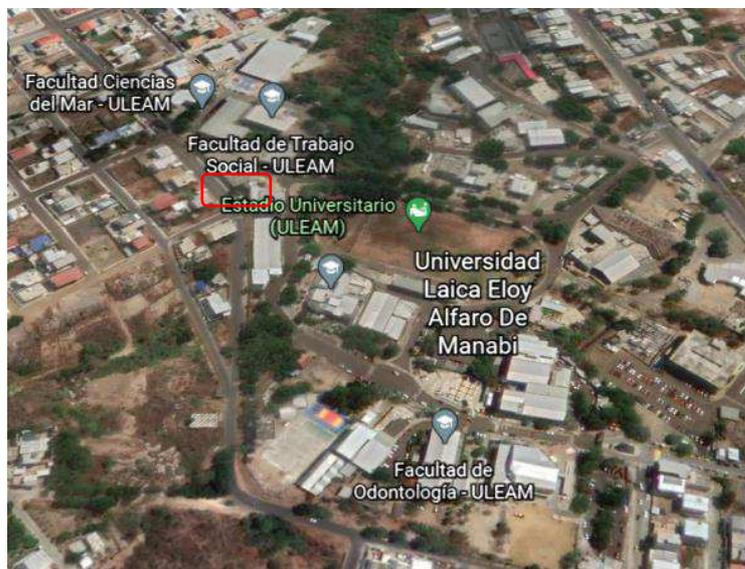


Figura 10 Facultad de Ingeniería Industrial campus universitario ULEAM.

2.1 Etapa 1. Diseño y construcción de la estructura mecánica para el seguidor solar
Siguiendo las directrices (Bekakra et al., 2019) quien utilizo sistemas de engranajes para darle movimiento mecánico tanto azimutal como doble inclinación a un seguidor solar de dos ejes, el uso de motores a paso, sensores y/o actuadores (Vieira et al., 2016), también otros estudios donde hacen uso de estructuras livianas y sistemas de rodamiento (Balaguer Zueco, 2016) (Jimenez, 2016) y (Perez, 2019). Tomando en cuenta los parámetros antes

mencionados se ha diseñado un sistema seguidor de dos ejes tomando en cuenta el movimiento azimutal y tipo doble inclinación, en el cual se han montado un panel solar fotovoltaico de célula monocristalina y se distribuye de la siguiente manera según los puntos 1, 2 y 3. Diseño de la base (1), diseño del movimiento azimutal (2) y diseño del movimiento lineal o tipo doble inclinación (3). Ver figura 11.

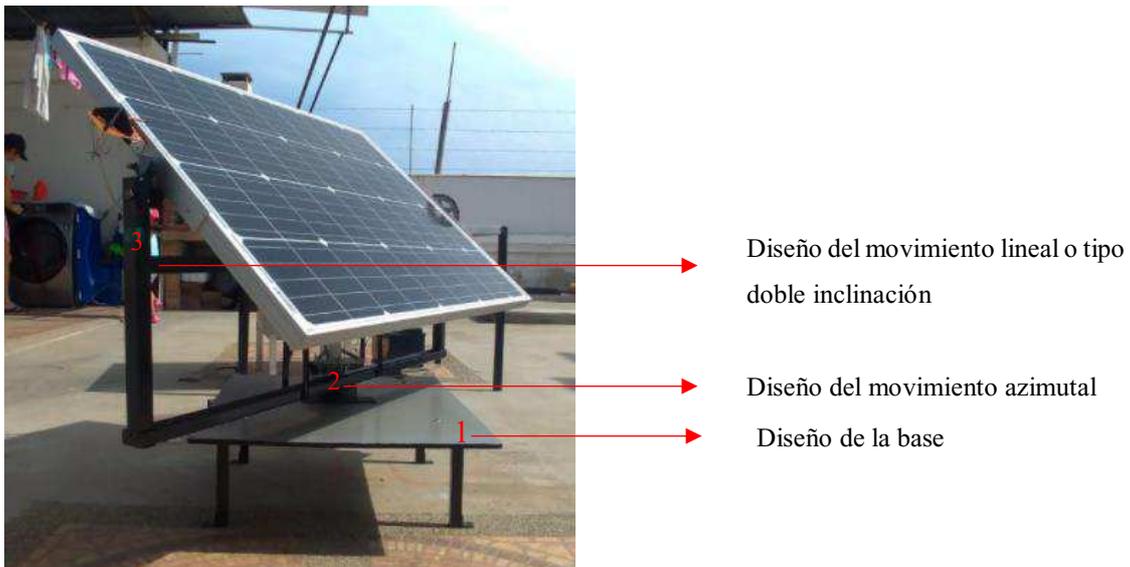


Figura 11. Seguidor solar de dos ejes (Los Autores, 2021)

Se consideran los criterios más importantes que se deben tomar en cuenta para la construcción mecánica del sistema:

- La estructura deberá ser resistente a fenómenos naturales impredecibles como lluvia y vientos leves o fuertes.
- El sistema se construirá con material de aluminio y acero por ser materiales livianos y resistentes a la corrosión, salvo a las estructuras que los sostienen que serán de metal, puesto a que serán empotradas.
- Se requiere que el sistema seguidor se mueva en dos ejes, que posea movimientos de forma lineal y perpendicularmente opuestas (azimut).
- El sistema deberá permitir un fácil desmontaje de piezas y partes.

A continuación, se describirá las diferentes partes del seguidor solar.

1. Diseño de la base

Tomando en cuenta los criterios antes mencionados se adoptó que la estructura de la base tenga la forma de una mesa, ya que presenta estabilidad al ser ubicada en superficies uniformes.

Se construye la estructura con hierro debido a la resistencia que este posee, y se coloca pintura anticorrosión sobre esta. Las patas de la mesa tienen soldadas una pequeña estructura en forma cuadrada con un agujero en el centro que permitirá más adelante que el sistema sea empotrado. Las dimensiones de la mesa son las siguientes: 25cm de alto * 60cm de largo* 51cm de ancho. Ver figura 12.



Figura 12 Base del seguidor solar de dos ejes (Los Autores, 2021)

2. Diseño Azimutal

Para llevar a cabo la construcción mecánica del presente trabajo de titulación se tomó como iniciativa utilizar un sistema de transmisión realizado mediante un sistema de engranaje por cadena, que consiste en utilizar dos ruedas dentadas de ejes paralelos situada a cierta distancia la una de la otra, que giran simultáneamente por efecto de una cadena metálica y que permite transmitir elevadas potencias sin pérdida de velocidad.

Para el engranaje1 se utilizó un piñón de 35mm de diámetro, mientras que para el engranaje2 se utilizó un piñón de 90 mm de diámetro. El engranaje2 se mantiene fijo debido al uso de un tornillo de 7 pulgadas que se tomó como referencia de eje, con arandelas que se colocan después del mismo. Es decir, tornillo, arandelas, engranaje. Por consiguiente, para que el engranaje2 se desplace de manera circular se adecuó un bocín, dichos materiales están sostenidos por un perfil metálico. Finalmente, el material que permitirá que el sistema gire de 0-360° es un rodamiento, ya que este permite la rotación

de un elemento con respecto a otro, por ello se elige un rodamiento cónico de 8mm debido a que puede mover pesos hasta de 15kg y el peso total del sistema es aproximadamente de 10,5kg.

La base que sostendrá el sistema completo se perforo y se colocó una pequeña estructura rectangular que permite el paso del tornillo y evita el roce del rodamiento cónico, en la parte de abajo tendrá una tuerca que ajusta y dos que son usadas como contra tuercas cuya tarea es evitar que el sistema pierda su firmeza.

El orden de los materiales usados es: tuerca, arandelas, engranaje de 90mm de diámetro, bocín, perfil metálico, rodamiento cónico, estructura rectangular, tuerca de ajuste y contratuercas. Ver figura 13.

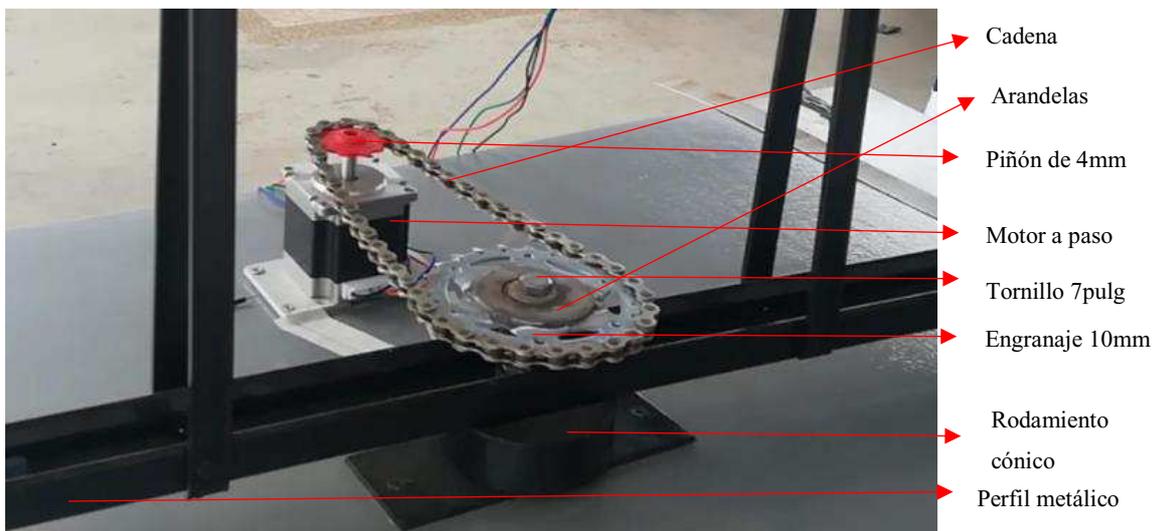


Figura 13. Diseño mecánico Azimutal (Los autores, 2021)

El mecanismo debe tener un movimiento continuo, el sistema buscará la mayor cantidad de luz durante el día para realizar su posicionamiento, para ello se necesita de un actuador, que puede ser bien un servomotor o un motor a paso. Generalmente los servomotores se utilizan en la construcción de seguidores solares cuando el sistema electrónico de control conlleva programación astronómica. En cambio, los motores a paso son ideales para la construcción de mecanismos en donde se requieren movimientos muy precisos, pueden moverse según la secuencia que se les indique a través de un microcontrolador (Ingeniería Mecafenix, 2017). Usualmente los motores a paso se utilizan en la construcción de un seguidor solar con sistema electrónico de control comandado por sensores, en criterios

antes mencionados hacen uso de un motor a paso HT23 – 397 y un motor Nema 23 de 4.2Nm modelo M34-4.2-1SB12-E2-A.

Tomando en cuenta los criterios para la selección del motor, se estimó que: el seguidor solar a realizarse buscará la radiación solar mediante sensores, por ende, y tomando en cuenta los costos variantes se utilizó un motor a paso. Teniendo los siguientes datos, se realizaron los cálculos necesarios para determinar el torque del motor a utilizarse.

DATOS

fm1= 6,5 kg

fm2 = 4 kg

Eg1= 35mm diámetro

Eg2= 90mm diámetro

Donde:

fm1= fuerza de la masa 1

fm2= fuerza de la masa 2

Eg1= diámetro del engranaje 1

Eg2= diámetro del engranaje 2

El torque se expresa en unidades de fuerza-distancia, su unidad de medida es Newton metro (Nm). Ver ecuación 1

$$T = F * d$$

(1)

La fuerza, se determina por kilogramo-fuerza ya que es la fuerza ejercida sobre un cuerpo de 1kg de masa, por tanto, para la selección de este motor, de debe tomar en cuenta que debe mover la fuerza promedio del todo el sistema, entonces:

$$F = Fm1 + fm2$$

$$F = 6,5kgf + 4 kgf$$

$$F = 10,5 kgf$$

La distancia requerida se toma a partir del radio del engranaje2, se conoce el diámetro de este, entonces:

$$r = \frac{d}{2}$$

$$r = \frac{90mm}{2} = 45mm$$

Obteniendo el resultado en cm:

$$45mm * \frac{1cm}{10mm} = 4,5cm$$

Resolviendo Ecuación (1):

$$T = 10,5 kg * 4.5cm = 47.25 kg cm$$

Se debe tomar en cuenta la relación que existe en los sistemas de engranajes, las unidades serán expresadas en cm, por tanto

i = relación de engranaje

$$i = \frac{Eg2}{Eg1} = 2.57$$

$$90mm * \frac{1cm}{10mm} = 9cm$$

$$35mm * \frac{1cm}{10mm} = 3,5cm$$

$$i = \frac{9cm}{3,5cm} = 2.57$$

Finalmente, para encontrar el torque total del motor se realiza la siguiente ecuación donde:

Tt= torque total

$$Tt = \frac{T}{i} = kgcm$$

$$T_t = \frac{47,25kgcm}{2,57} = 18,38kgcm$$

Realizando una regla de simple para obtener el torque en Nm tenemos

$$18,38kg.cm * \frac{1m}{100cm} * \frac{9.8N}{1kg} = 1,80 Nm$$

Por lo tanto, se utilizará un motor a paso de las siguientes características:

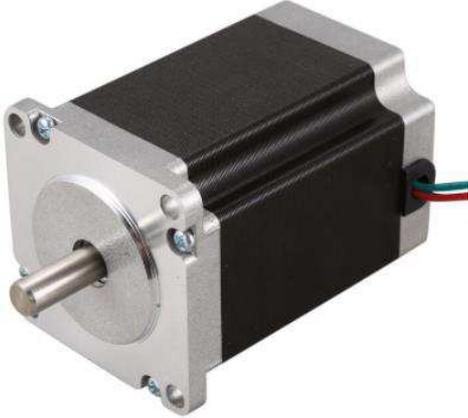
Modelo: Nema23 57HS76	
Ángulo de paso: 1,8 grados	
Corriente: 1.5 ^a	
Tamaño: longitud del eje: 21mm	
Momento estático: 1.8N.m	
Diámetro del eje Biaxial: 6,35 MM	
Longitud del cuerpo: 76MM	
Tamaño: longitud del eje: 21mm	

Tabla 1. Motor a paso elegido para realizar el movimiento azimutal.

Para la protección del sistema es necesario la utilización de finales de carrera, los cuales tendrán la función de enviar señales a la placa Arduino para evitar que los motores sigan en funcionamiento cuando llegue a sus límites mecánicos permitidos. Se escogió un final de carrera con las siguientes características: Con vara lateral metálica flexible de 30mm, accionamiento rápido, cuerpo plástico, capaz de soportar 500mA corriente con la cual la tarjeta Arduino trabaja. Ver figura 14.



Figura 14 Final de carrera colocado para detener el motor que produce el movimiento azimutal (Los Autores, 2021)

3. Diseño del movimiento lineal o tipo doble inclinación

Tomando la estructura azimuthal, se colocaron tubos cuadrados del mismo tamaño y grosor en las esquinas del perfil metálico sostenidos por ángulos y remaches. Se colocó un tubo de aluminio paralelo al Chanel de fijación que servirá de base para colocar el otro motor sin embargo se notó que la estructura era muy endeble, por ende, se colocaron cuatro tubos laterales de aluminio (dos por cada sección) y de esta manera se logró que quede de manera firme. Ver figura 15.

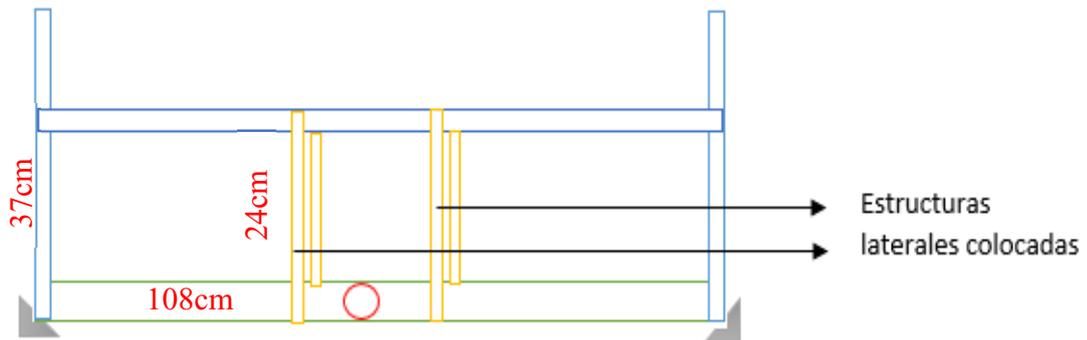


Figura 15 Bosquejo del sistema mecánico del seguidor solar con movimiento lineal para que se mantenga firme (Los autores, 2021).

De la misma manera en que se realizó el sistema de transmisión del mecanismo que permite el movimiento azimuthal se hizo con el movimiento tipo doble inclinación, mediante un sistema de engranaje por cadena, tal como se mostró en la figura 5. Con la diferencia que los engranajes tienen diferentes diámetros, el engrane1 es de 35mm mientras que el engranaje2 es de 110mm. Ver figura 16.



Figura 16 Sistema de engranaje por cadena para el movimiento tipo doble inclinación (Los Autores, 2021)

El sistema de engranaje deberá estar situado en el punto medio lateral del panel solar para que el peso este distribuido equitativamente, para ello se perforo ambos laterales del panel a una distancia de 33,5 cm, colocando un perno de 7pulgadas en ambos lados, en lado lateral izquierdo se colocó el sistema de engranaje (Ver figura 16) mientras que en el lado derecho un bocín que permite el libre movimiento (Ver figura 17).

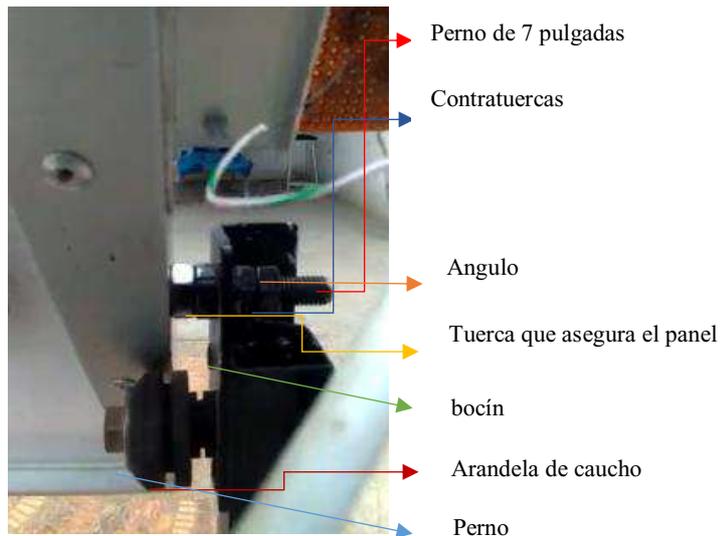


Figura 17 Perfil del soporte lateral derecho del panel (Los Autores, 2021)

Para la selección del motor que permita el movimiento tipo doble inclinación se realiza un análisis que permitirá determinar el torque del mismo. Se tiene como referencia los siguientes datos.

DATOS

fm1= 6,5 kg

Eg1= 35mm diámetro

Eg2= 110mm diámetro

Donde:

fm1= fuerza de la masa 1

Eg1= diámetro del engranaje 1

Eg2= diámetro del engranaje 2

El torque se expresa en unidades de fuerza-distancia, su unidad de medida es Newton metro (Nm). Ver ecuación 1

$$T = F * d$$

La fuerza, se determina por kilogramo-fuerza ya que es la fuerza ejercida sobre un cuerpo de 1kg de masa, por tanto, para la selección de este motor, de debe tomar en cuenta que debe mover la fuerza promedio del todo el sistema, entonces:

$$F = Fm1 + fm2$$

$$F = 6,5kgf + 4 kgf$$

$$F = 10,5 kgf$$

La distancia requerida se toma a partir del radio del engranaje2, se conoce el diámetro de este, entonces:

$$r = \frac{d}{2}$$

$$r = \frac{110mm}{2} = 55mm$$

Obteniendo el resultado en cm:

$$55mm * \frac{1cm}{10mm} = 5,5cm$$

Resolviendo Ecuación 1:

$$T = 6,5 kgf * 5,5cm = 35.75 kg cm$$

Se debe tomar en cuenta la relación que existe en los sistemas de engranajes, las unidades serán expresadas en cm, por tanto

i = relación de engranaje

$$i = \frac{Eg2}{Eg1} = 2,57$$

$$110mm * \frac{1cm}{10mm} = 11cm$$

$$35mm * \frac{1cm}{10mm} = 3,5cm$$

$$i = \frac{11cm}{3,5cm} = 3,14$$

Finalmente, para encontrar el torque total del motor se realiza la siguiente ecuación donde:

Tt= torque total

$$Tt = \frac{T}{i} = kgcm$$

$$Tt = \frac{35,75kgcm}{3,14} = 11,38kgcm$$

Realizando una regla de simple para obtener el torque en Nm tenemos

$$11,38kg.cm * \frac{1m}{100cm} * \frac{9.8N}{1kg} = 1,10 Nm$$

Por lo tanto, se utilizará un motor a paso de las siguientes características:

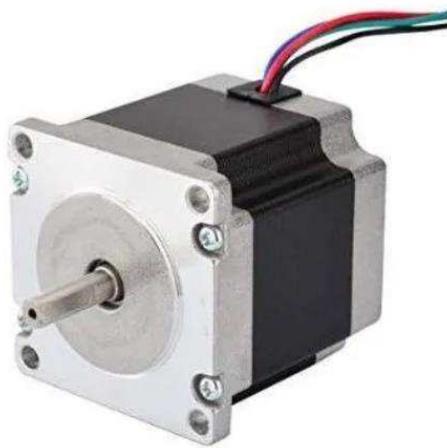
Modelo: Nema23 57HD4016-01	
Ángulo de paso: 1,8°	
Corriente: 2ª	
Numero de fases: 2	
Torque: 1.2N.m	
Inercia del motor: 280 g/cm ²	
Resistencia por Fase: 2.1 Ohm	
Tamaño: longitud del eje: 21mm	

Tabla 2 Motor a paso elegido para realizar el movimiento tipo doble inclinación (Los Autores,2021)

De la misma manera para la protección del sistema es necesario la utilización de finales de carrera, los cuales tendrán la función de enviar señales a la placa Arduino para evitar que los motores sigan en funcionamiento cuando llegue a sus límites mecánicos permitido

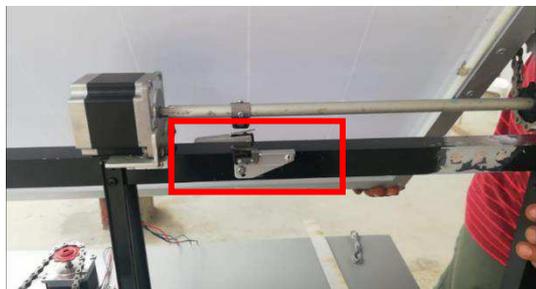


Figura 18 Limitadores eléctricos (Los Autores, 2021)

2.2 Etapa 2. Diseño de la parte Electrónica y programación del seguidor solar

Para que el seguidor solar de dos ejes busque posicionarse de manera que reciba los rayos del sol de forma perpendicular se dispondrá del uso de sensores y/o actuadores que serán

los encargados de llevar señales correctas para que los actuadores realicen su función de mover el panel solar a la posición deseada. Para esto los dispositivos responsables de recopilar datos del sistema son los sensores los cuales son controlados por un Arduino mega 2590. Las variables de medida son: voltaje, temperatura, luminosidad y corriente, para ello se analizaron varias alternativas de elección. Ver figura 19.

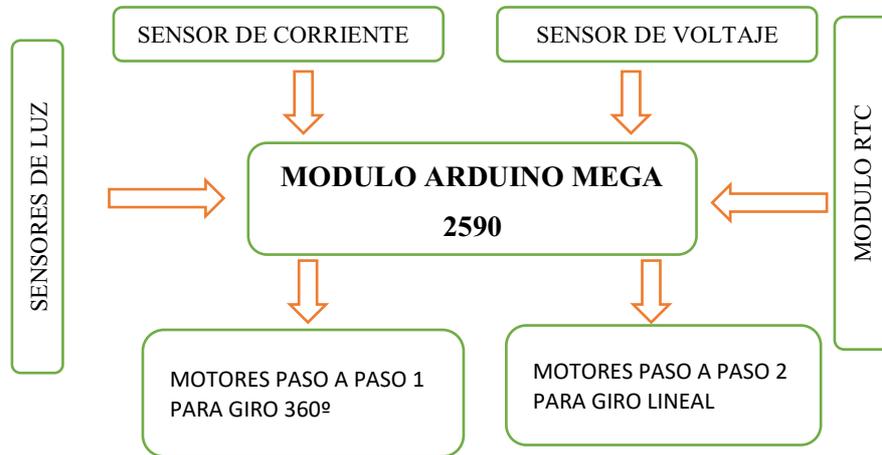
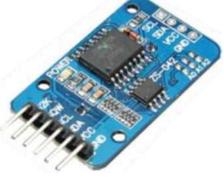
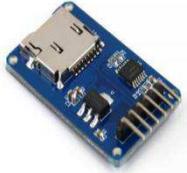


Figura 19 Diagrama de Bloques de la parte electrónica del seguidor solar de dos ejes (Los Autores, 2021)

En la siguiente tabla se especifican los diferentes sensores utilizados y los rangos de operación en cuanto a tensión, voltaje, temperatura etc.

NOMBRE	CARACTERISTICAS	DETALLES	IMAGEN
Sensor LDR	Tamaño de 5mm. Material fotosensible: CdS (Sulfato de Sodio)	Resistencia en luz (10 lux): 8K-20K Ohm. Resistencia en oscuridad: 1M Ohm. Voltaje máx: 150V. Potencia máx: 100mW.	
Sensor LM35	Bajo consumo energético: 60uA Pines: +VCC, V salida, GND Baja impedancia de salida	Voltaje de Operación: 4V – 30V (5V recomendado) Rango de Trabajo: -55°C hasta +150°C Precisión en el rango de -10°C hasta +85°C: ±0.5°C Pendiente: 10mV / °C	
Sensor ACS712ELC 20A	Resistencia interna: 1.2 mΩ Mínimo voltaje de aislamiento entre pines 1-4 a pines 5-8: 2.1 kVRMS	Voltaje de salida: Analog output 66mV / A Voltaje de operación: 4.5V ~ 5.5V Sensitividad de salida: 66 to 185 mV/A	
Reloj ds3231	Maneja todas las funciones para el mantenimiento de fecha/hora. Registro de segundos, minutos, horas, día de la semana, fecha, mes y año con compensación de años bisiestos hasta 2100.	Voltaje de alimentación de 3.0 a 5 volts. 2 alarmas programables por hora/fecha. Salida de señal cuadrada programable. Incluye sensor de temperatura con exactitud de +/- 3 grados centígrados	
Modulo lector micro SD	Compatible: Tarjeta MicroSD y Micro SDHC Interface de comunicación: SPI Agujeros de instalación: 4 (diámetro del agujero de 2.2mm)	Pines: 6 (GND, VCC, MISO, MOSI, SCK, CS) Fuente de alimentación: 4.5 V-5.5 V, 3.3 V circuito regulador de voltaje	
Tarjeta micro SD	Dimensiones: 15.0 ×11.0 ×1.0 milímetros. Peso: 0,258g aprox Protección contra escritura: no. Protectores de terminal: no	Voltaje: 2,7 -3,6.	
Controlador TB6600	Protección térmica automática Protección contra funcionamiento a bajo voltaje Protección contra sobre corriente Entradas y salidas mediante borneras	Voltaje máximo de salida: 50 V Corriente pico de salida: 5 A Corriente máxima de trabajo: 4.5 A	

<p>Arduino Mega 2560</p>	<p>Microcontrolador: ATmega2560 Memoria Flash: 256 KB (8KB usados por el bootloader) SRAM: 8KB</p>	<p>Voltaje Operativo: 5V Tensión de Entrada: 7-12V Voltaje de Entrada(límites): 6-20V Pines digitales de Entrada/Salida: 54 (de los cuales 14 proveen salida PWM) Pines analógicos de entrada: 16 Corriente DC por cada Pin Entrada/Salida: 40 mA Corriente DC entregada en el Pin 3.3V: 50 mA</p>	
--------------------------	--	--	---

Tabla 3 Sensor LDR y sus principales características.

Para los sensores LDRS se efectuó este diseño con la finalidad de que a medida que el sol cambie su posición el escudo genere una sombra y dos de ellos queden iluminados por el sol. El circuito de control se da cuenta de esta condición y envía la señal de accionamiento del motor a paso, hasta los cuatro LDR se iluminen uniformemente. Ver figura 20.

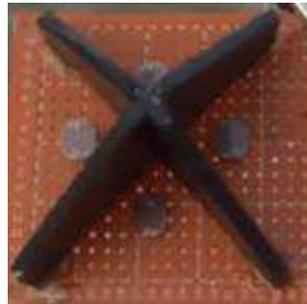


Figura 20 Disposición de los sensores LDR al posicionamiento de la estructura (Los autores, 2021)

Para realizar el diseño del circuito electrónico se utiliza el software Fritzing, esta es una herramienta que permite añadir diversos componentes, de manera que se pueda visualizar todo el circuito en conjunto. En la figura 21 se puede observar el circuito electrónico encargado de enviarla señal sobre la posición del sol.

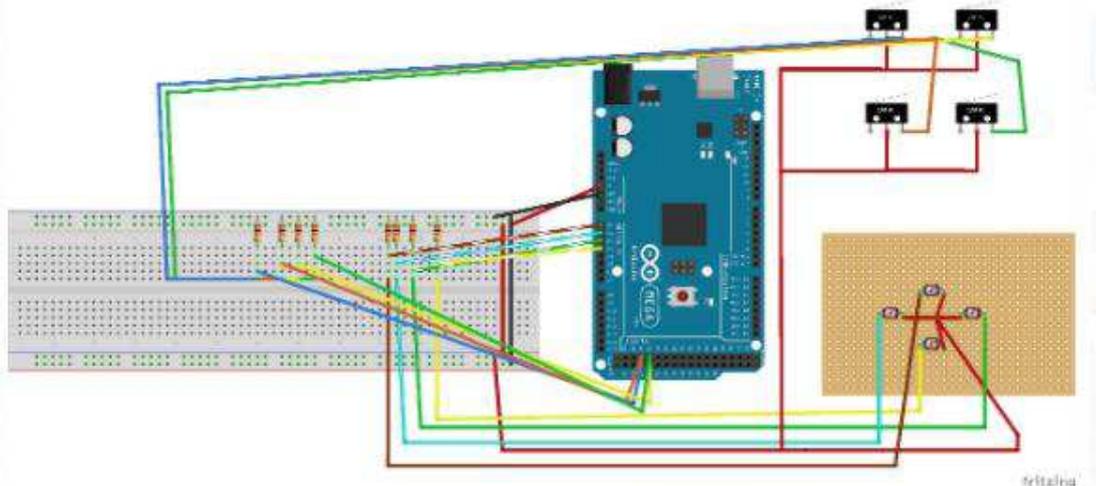


Figura 21 Diagrama de conexión de sensores de luz y limitadores eléctricos hacia el módulo Arduino

(Los Autores, 2021)

En la figura 22 se indica la conexión encargada de realizar el movimiento del panel solar fotovoltaico, esto mediante las señales de activación enviadas por el módulo Arduino a los drivers de los motores mismos que serán los encargados de energizar los motores a paso en función de la señal suministrada por el Arduino.

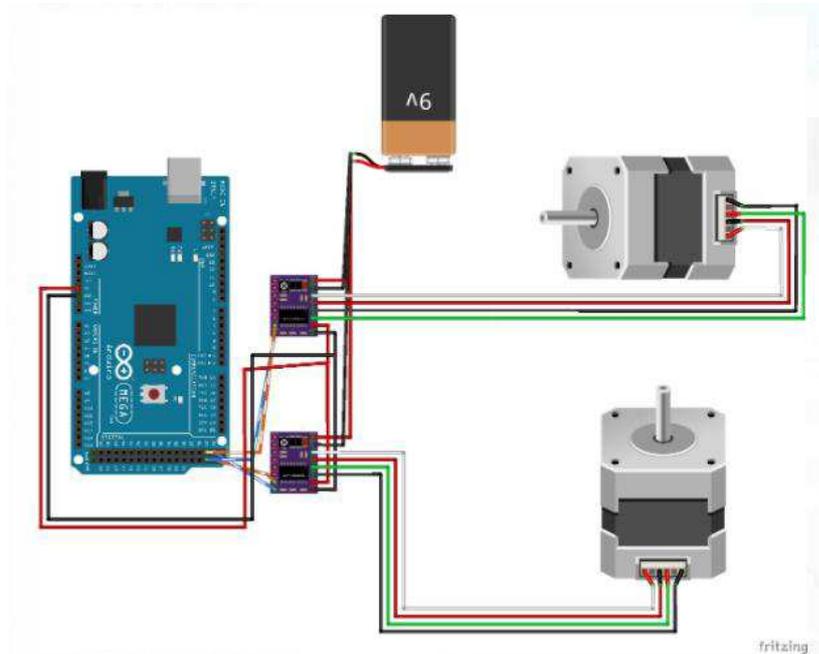


Figura 22 Diagrama de conexión de los drivers y los motores a paso con el módulo Arduino Mega 2560 (Los Autores 2021)

En la figura 23 se enseña la conexión del sensor encargado de realizar la lectura de la corriente del panel solar, tomando en cuenta los pines de conexión de dicho sensor, y cómo se conectan al módulo Arduino encargado de interpretar estas señales recibidas. Asimismo, se muestran cuatro resistencias en las que cada dos de ellas se interpretaran como un divisor de voltaje logrando así la lectura del voltaje. Es importante tener en cuenta que el voltaje se mide en paralelo y la corriente en serie a la hora de ser conectado al panel solar.

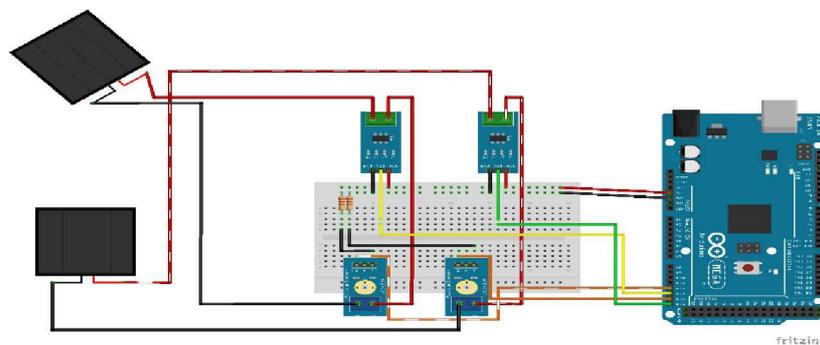


Figura 23 Diagrama de conexión de los sensores de corriente y las resistencias hacia el Modulo Arduino Mega 2560 (Los Autores, 2021)

En la figura 24 se muestra la conexión del Reloj ds3231 y el módulo micro SD con el Arduino.

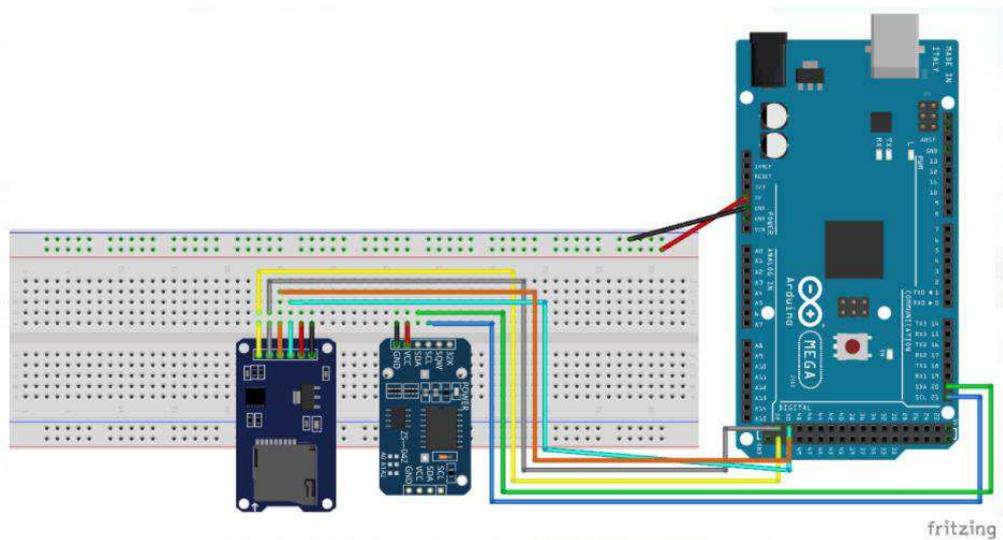


Figura 24 Diagrama de conexión del Reloj Ds32311 y el módulo micro SD hacia el Arduino Mega 2560 (Los Autores, 2021)

Finalmente se muestran las conexiones de los componentes que van a permitir la ejecución correcta del movimiento y adquisición de datos del panel solar fotovoltaico. Ver figura 25.

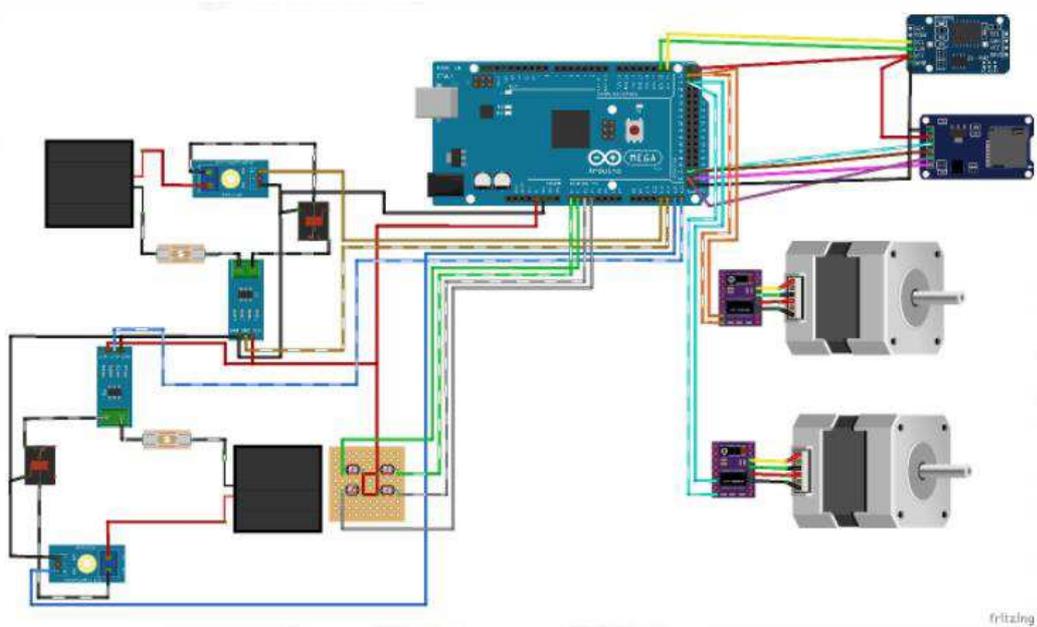


Figura 25 Diagrama de todas la conexiones de componente del seguidor solar de dos ejes (Los Autores, 2021)

Se muestra un diagrama de flujo que contiene la información básica de la programación que se realizó. Ver figura 26.

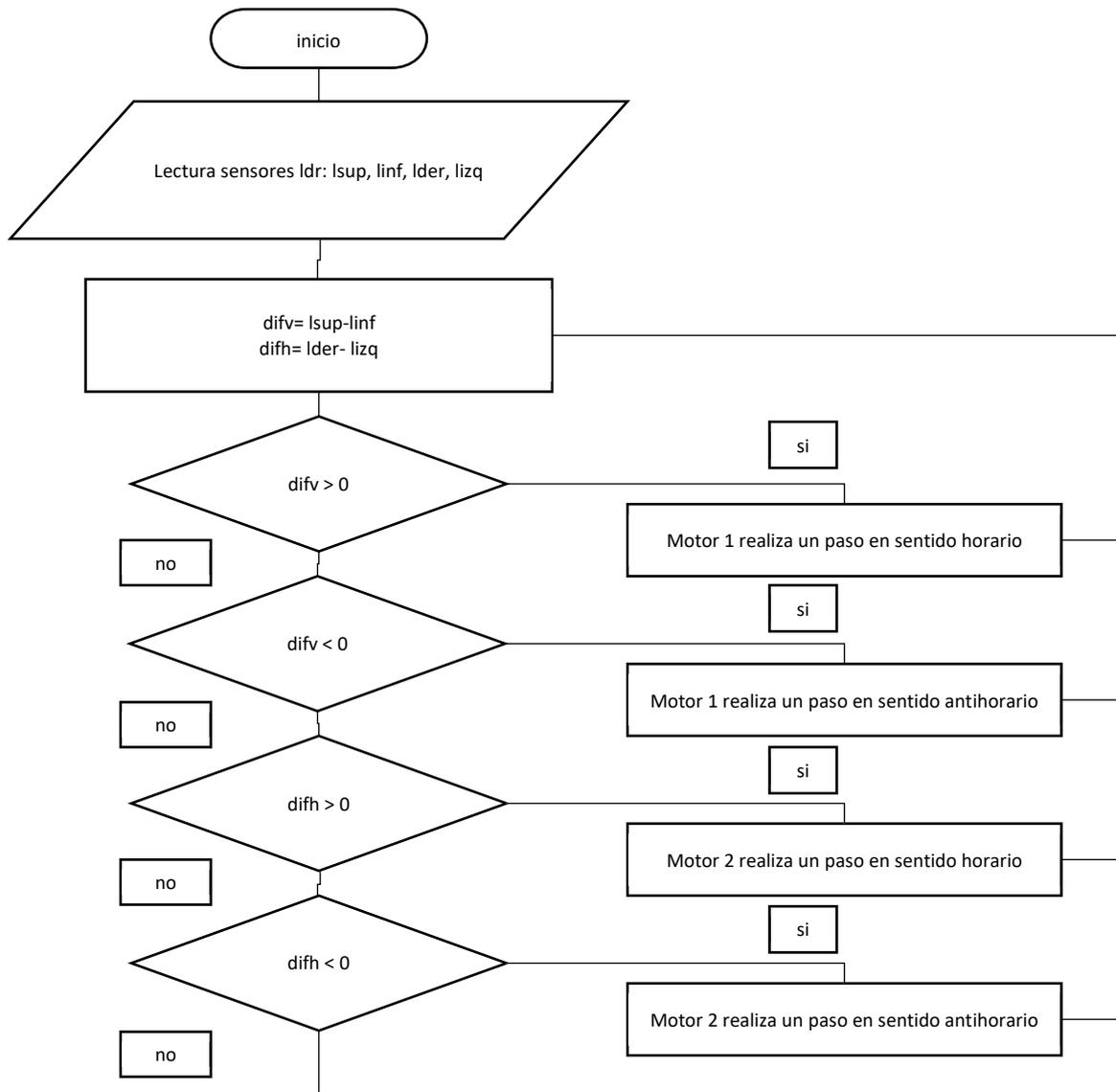


Figura 26 Diagrama de flujo de la programación del sistema (Los Autores, 2021)

CAPITULO III

3. PROPUESTA

3.1 Introducción

La energía solar es la energía renovable más limpia e inagotable que existe, por ello estudiarla y sacarle provecho al máximo es uno de los grandes retos que se han planteado en los últimos años. Desde la recolección, almacenaje y transformación, sin que exista mucha pérdida, estos parámetros han permitido que a lo largo de las últimas décadas varios investigadores centren sus trabajos en busca de alternativas que mejoren la eficiencia de obtención y producción de energía eléctrica.

Es por esto por lo que desde finales del siglo XX y principios del siglo XXI se han venido desarrollando e implementando estructuras que permiten un mejor posicionamiento del panel solar de manera que esta siga la trayectoria del sol permitiendo que capte la radiación solar perpendicularmente durante el día.

Sin embargo, la adquisición de estos sistemas sigue siendo un problema económico, debido a que los costos de producción son elevados, esto conlleva a que aún se sigan instalando los paneles solares de manera estática. Es importante destacar que la eficiencia de un sistema seguidor versus un sistema fijo no es el mismo si se instala en diferentes partes del mundo, debido a que los rayos del sol no inciden de la misma manera en todo el planeta y que se debe tomar en cuenta la estación climática en la que se encuentra el lugar de instalación. Estudios ya realizados en diversas partes del mundo demuestran que si comparan estos dos sistemas existe una eficiencia mayor de producción a favor del que sigue la trayectoria del sol.

En Turquía se realizó una investigación donde se determinó que la diferencia de rendimiento es de un 64% para el sistema de seguimiento de dos ejes en comparación con el sistema fotovoltaico fijo, el estudio se realizó en los meses de mayo y junio (Kivrak et al., 2012).

Así mismo en Singapur se determinó que la eficacia de un sistema de seguimiento solar de dos ejes es del 21% superior a un sistema convencional fijo (Oh et al., 2015). Mientras que en Siria se indicó que el rendimiento de un módulo fotovoltaico con seguimiento de eje vertical es 20% más eficiente que un módulo fijo (Al-Mohamad, 2011). En Grecia se

comprobó que un sistema seguidor de dos ejes capto un 46.46% más de energía que un sistema tradicional fijo (Bakos, 2006).

En México mediante un método experimental se demostró que la diferencia de rendimiento entre un sistema seguidor de dos ejes es de un 25% más que un sistema solar fijo (Pelayo López et al., 2018). Por otro lado, en el País de Salvador se expusieron dos estudios: La eficiencia de un seguidor solar de un eje en un día soleado dio como resultado 38% más que un sistema fijo, mientras que el sistema seguidor de dos ejes es 20% más eficiente que un sistema convencional. En Brasil en un lugar de latitud 5° se instaló un seguidor solar de un eje y sistema fijo donde se estipuló que el primero tiene una mejora del 11% de eficiencia (Vieira et al., 2016).

En Ecuador se han realizado dos investigaciones: Una de ellas en la ciudad de Milagro en la que se demostró que la eficiencia de un seguidor solar de ejes incremento en un 17% más que un sistema fijo (Jalón Villón & Herrera Cruz, 2019), Mientras que en la ciudad de Quito (Latitud 0°) compararon el rendimiento de un seguidor solar de dos ejes y un seguidor de 1 en la que se estipuló que el rendimiento es de tan solo un 4%.

En la ciudad de Manta provincia de Manabí no existen estudios realizados sobre la temática planteada, pese a ser una ciudad ubicada en el perfil costero donde la mayor parte del año el día es soleado y despejado.

En el presente capítulo se da a conocer la propuesta de desarrollo comparativo, los estudios de factibilidad, los recursos asignados al desarrollo y las fases de desarrollo que se llevó a cabo en el proyecto.

3.2 Descripción de la propuesta

La propuesta del presente trabajo de titulación consiste en desarrollar un análisis comparativo entre un seguidor solar de dos ejes y un panel solar estático, que nos permita comprobar si la mejora de producción de energía es significativa y si los costos asociados son compensados por este aumento. Lo cual se conseguirá previo al diseño y construcción de un seguidor solar de dos ejes.

Se propone instalar ambos sistemas en las instalaciones del campus universitario ULEAM en la azotea del edificio de ingeniería industrial, los cuales por un tiempo aproximado de

un mes a través de sensores y/o actuadores recogerán datos de temperatura de modulo, voltaje y corriente, que serán controlados por un Arduino y enviados a una base de datos.

Tanto el seguidor de dos ejes y el panel solar fijo poseen células solares de igual características, y estarán trabajando bajo las mismas condiciones. Ver figura 28.

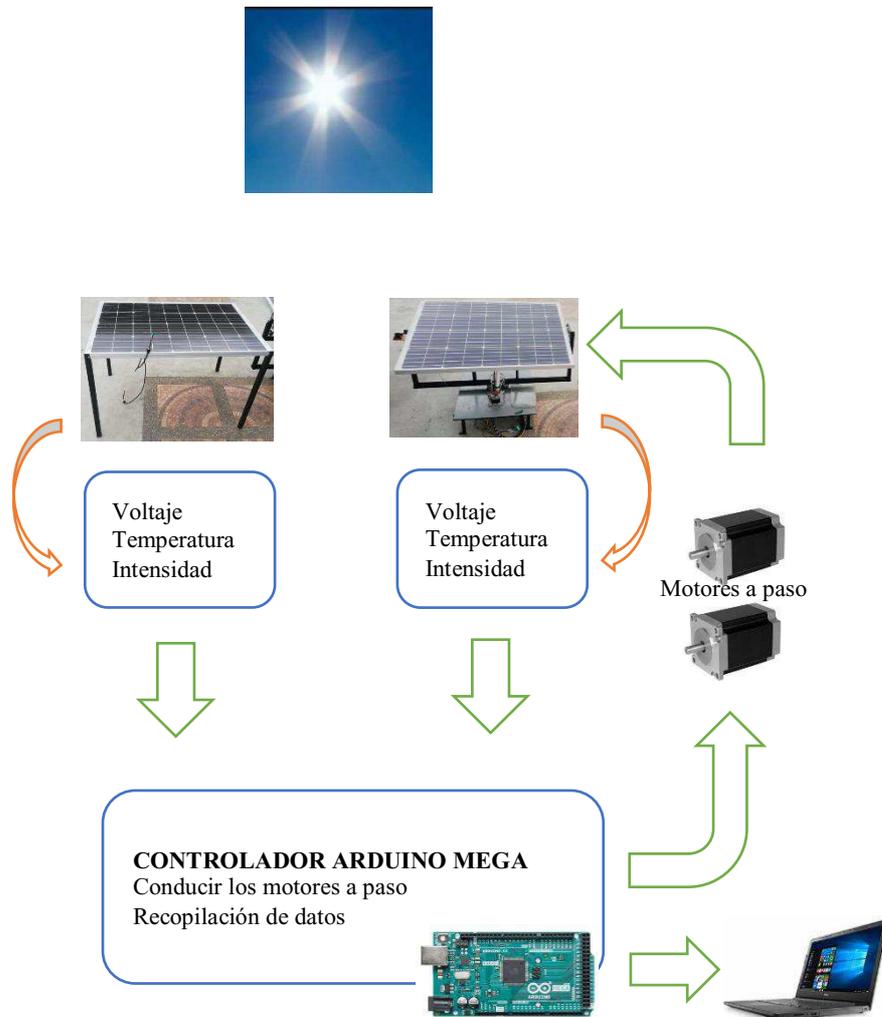


Figura 27 Propuesta para el desarrollo de un análisis comparativo entre un seguidor solar de dos ejes y panel fotovoltaico fijo (Los Autores, 2021)

Para la obtención de datos de radiación se hará uso de la estación meteorológica misma que está instalada en los predios del campus universitario ULEAM, facultad de ingeniería industrial a pocos metros de instalación de los paneles solares, la cual mediante el sensor piranómetro está emitiendo datos de radiación por minuto que son receptados y mostrados en una página web. Ver Figura 29.

Para calcular los datos se pretende utilizar un circuito que nos permita calcular el voltaje en circuito abierto y la corriente en cortocircuito, se utilizó un relé que por medio del

arduino nos permitía abrir y cerrar el sistema, la recolección de datos se realizó de la siguiente manera, durante 30 seg. se obtenían 150 lecturas de voltaje y después durante otros 30 seg. 150 lecturas de corriente, la temperatura se obtenía durante todo el minuto.

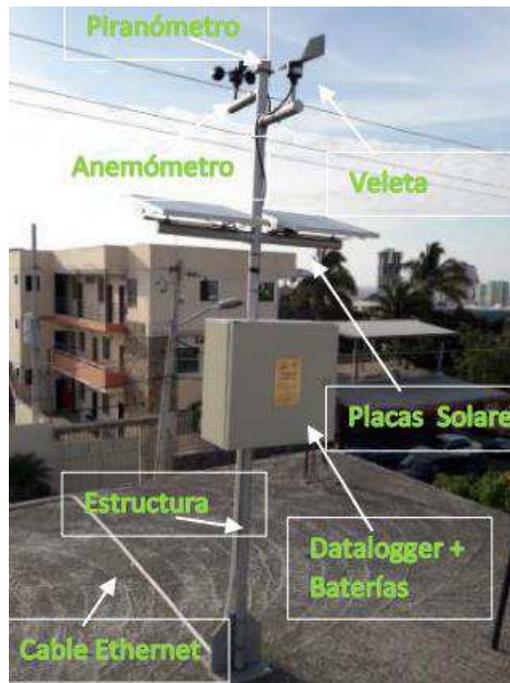


Figura 28 Estación Meteorológica ULEAM (Ponce Jara et al., 2020)

3.3 Alcance de la propuesta

En el presente trabajo de investigación se realizará un muestreo dirigido a la obtención de producción de energía proporcionada por los paneles solares (seguidor solar y panel fijo) con enfoque cuantitativo.

3.4 Factibilidad

3.4.1 Factibilidad técnica

Para desarrollar el análisis comparativo entre un seguidor solar de dos ejes y un panel fotovoltaico fijo es necesario desarrollar estructuras metálicas para el caso del panel solar que estará estático, así, como también desarrollar una estructura mecánica para el seguidor solar de dos ejes, como se mencionó en el capítulo anterior ambos sistemas enviarán señales mediante sensores y/o actuadores para lo cual es necesario desarrollar códigos de programación en Arduino.

3.4.2 Factibilidad económica

RECURSOS TECNOLOGICOS				
DESCRIPCION	CANTIDAD	PRECIO	TOTAL	
Computadoras personales	2	\$0	\$0	
TOTAL			\$0	
RECURSOS HUMANOS				
DESCRIPCION	PERSONA	HORASS	PRECIO POR HORAS	TOTAL
Desarrollo del algoritmo	1	\$50	\$3,50	\$175
TOTAL				\$175
RECURSOS MATERIALES				
DESCRIPCION	CANTIDAD	PRECIO	TOTAL	
Infraestructura mecánica del seguidor solar de dos ejes y panel solar estático fijo	1	\$950	\$1194	
TOTAL			\$1194	
OTROS RECURSOS				
DESCRIPCION	CANTIDAD	PRECIO	TOTAL	
Transporte	1	\$30	\$30	
TOTAL			\$30	
			SUBTOTAL	\$1.399
			IVA	\$168
			TOTAL	\$1.567

Tabla 4 Factibilidad económica (Los Autores, 2021)

3.5 Recursos

3.5.1 Recursos humanos

RECURSO HUMANO	FUNCIONES
Marcos Ponce Jara PHD	Tutor encargado del proyecto de titulación
Iván Fernando Salvador Tuárez	Autor y desarrollador del proyecto de titulación
María Mercedes Reyes Mero	Autor y desarrollador del proyecto de titulación

Tabla 5 Recursos Humanos (Los Autores, 2021)

3.5.2 Recurso Tecnológicos

RECURSO TECNOLÓGICO	FUNCIONES
Arduino Mega	Software de programación
Fritzing	Software para diseño electrónico
Lucichard	Software para la creación de diagrama de flujos
Computadoras personales	Herramienta para el desarrollo del sistema y realización de la documentación
Estación Meteorológica ULEAM	Se utilizara para obtener los datos de radiación y humedad.

Tabla 6 Recurso Tecnológicos (Los autores, 2021)

CAPITULO IV

4. APLICACION DE LA PROPUESTA Y EVALUACION DE LOS RESULTADOS

4.1 Introducción

A nivel mundial los seguidores solares están aumentando en popularidad debido a que en varios países del mundo se ha llegado a determinar que la eficiencia y producción de energía es superior a un panel solar instalado de manera fija, como se mencionó en capítulos anteriores la manera en la que inciden los rayos del sol en el planeta es diferente en todos los países del mundo. Ecuador al estar situado en la línea equinoccial y al tener dos estaciones climáticas es considerado uno de los pocos países privilegiados debido a que los rayos del sol inciden de manera perpendicular, Manta provincia de Manabí es una de las ciudades que se encuentra ubicada en el perfil costero donde la mayor parte del año su clima es cálido, ya que no existen investigaciones que determinen la diferencia de producción de energía entre un seguidor solar de dos ejes y un sistema solar instalado de manera fija, de esta manera aprovechando la ubicación geográfica se propuso realizar un análisis comparativo. Durante los meses de febrero, marzo y abril se ensambló y se puso a prueba un seguidor solar de dos ejes basados en sensores.

Con ayuda de la estación meteorológica instalada en los predios de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí (ULEAM), se tomaron los datos de radiación para ambos sistemas. Es importante recalcar que los datos que recolecta el seguidor solar como el panel solar fijo son: **voltaje, amperaje, temperatura, radiación entre otros**. Los datos son almacenados en intervalos de 1 minuto. Ambos sistemas fueron colocados a pocos metros de la estación meteorológica. Ver figura 30.



Figura 29 A la izquierda se encuentra el panel solar con sistema de seguimiento, a la derecha, el panel solar de posición fija y bajo este, la batería y el tablero donde se encuentran los elementos encargados de la recepción de datos. En el centro de ambos sistemas se encuentra la estación Meteorológica (Los autores, 2021)

El seguidor solar de dos ejes, el panel solar instalado de manera fija y la estación meteorológica empezaron a trabajar conjuntamente desde el día sábado 1 de mayo entrando a una etapa de prueba, una vez que se corrigieron pequeños errores y confirmando que los datos que emitían eran correctos, se abordó a recolectar datos desde el día lunes 14 de junio.

4.2 Resultados y Discusión

Como se determinó con anterioridad los datos de ambos sistemas son almacenados en intervalos de 1 minuto, el análisis de rendimiento se realizará por día, desde la instalación y finalmente se mostrarán resultados promediando los días que estuvieron trabajando. Durante los días que se pusieron en marcha ambos sistemas, se realizó una bitácora en la cual en horarios establecidos de 9 Am, 12 Pm y 3 Pm se tomó en cuenta la condición climática en la que se encontraba el día. Ver tabla 7

Así mismo a continuación con los datos mostrados se procede a presentar de manera gráfica los resultados, haciendo una comparativa entre radiación y producción de energía, y de la misma manera se realiza con los datos de temperatura.

De la misma manera una vez mostrado los resultados diarios se realizará un análisis diario tanto de producción de energía como de temperatura de ambos sistemas. (Ver anexos 1)

RENDIMIENTO DIARIO DE AMBOS SISTEMAS						
AMBOS SISTEMAS		SEGUIDOR SOLAR		SISTEMA FIJO		CONDICION CLIMATICA
FECHA	RADIACION (w/m2)	ENERGIA (WH)	TEMPERATURA (c°)	ENERGIA (WH)	TEMPERATURA (c°)	
14 DE JUNIO	182,82	259,26	25,61	197,91	24,24	Nublado
15 DE JUNIO	199,45	291,39	27,16	230,2	26	Nublado
16 DE JUNIO	346,61	473,46	28,62	331,83	27,29	Parcialmente nublado
17 DE JUNIO	223,75	138,99	23,8	100,02	23,19	Totalmente nublado
18 DE JUNIO	418,8	613,95	28,62	526,69	26,83	Soleado y despejado
19 DE JUNIO	393,95	476,7	23,83	387,93	26,61	Soleado y despejado
20 DE JUNIO	318,1	329,3	26,72	302,84	25	Nublado
21 DE JUNIO	303,47	302,85	29,15	271,77	25,31	Nublado
22 DE JUNIO	412,49	720,99	28,5	583,28	26,94	Soleado y despejado
23 DE JUNIO	302,01	456,08	25,96	383,13	25,75	Nublado
24 DE JUNIO	358,45	508,48	29,71	453,2	24,47	Parcialmente nublado
25 DE JUNIO	402,93	687,85	27	608,53	25,54	Soleado y despejado
26 DE JUNIO	235,61	371,67	24,98	326,37	23,6	Nublado
27 DE JUNIO	300,41	493,03	27,91	424,3	26,61	Parcialmente nublado
28 DE JUNIO	293,18	414,59	27,78	341,38	26,48	Parcialmente nublado
29 DE JUNIO	405,69	703,3	29,25	613,18	27,95	Soleado y despejado
30 DE JUNIO	287,96	488,63	26,77	428,68	25,36	Parcialmente nublado
1 DE JULIO	524,89	765,09	29,25	660,31	27,94	Soleado y despejado
2 DE JULIO	396,72	512,4	27,98	418,12	26,68	Parcialmente nublado
3 DE JULIO	494,42	511,35	29,68	460,24	28,43	Soleado y despejado
4 DE JULIO	391,38	318,99	27,79	276,27	26,56	Nublado
PROMEDIO	342.52	9838,35	27.43	8326,18	26.03	

Tabla 7 Analisis de rendimiento diario del sistema seguidor solar de dos ejes, sistema fijo, temperatura y radiación (Los autores, 2021)

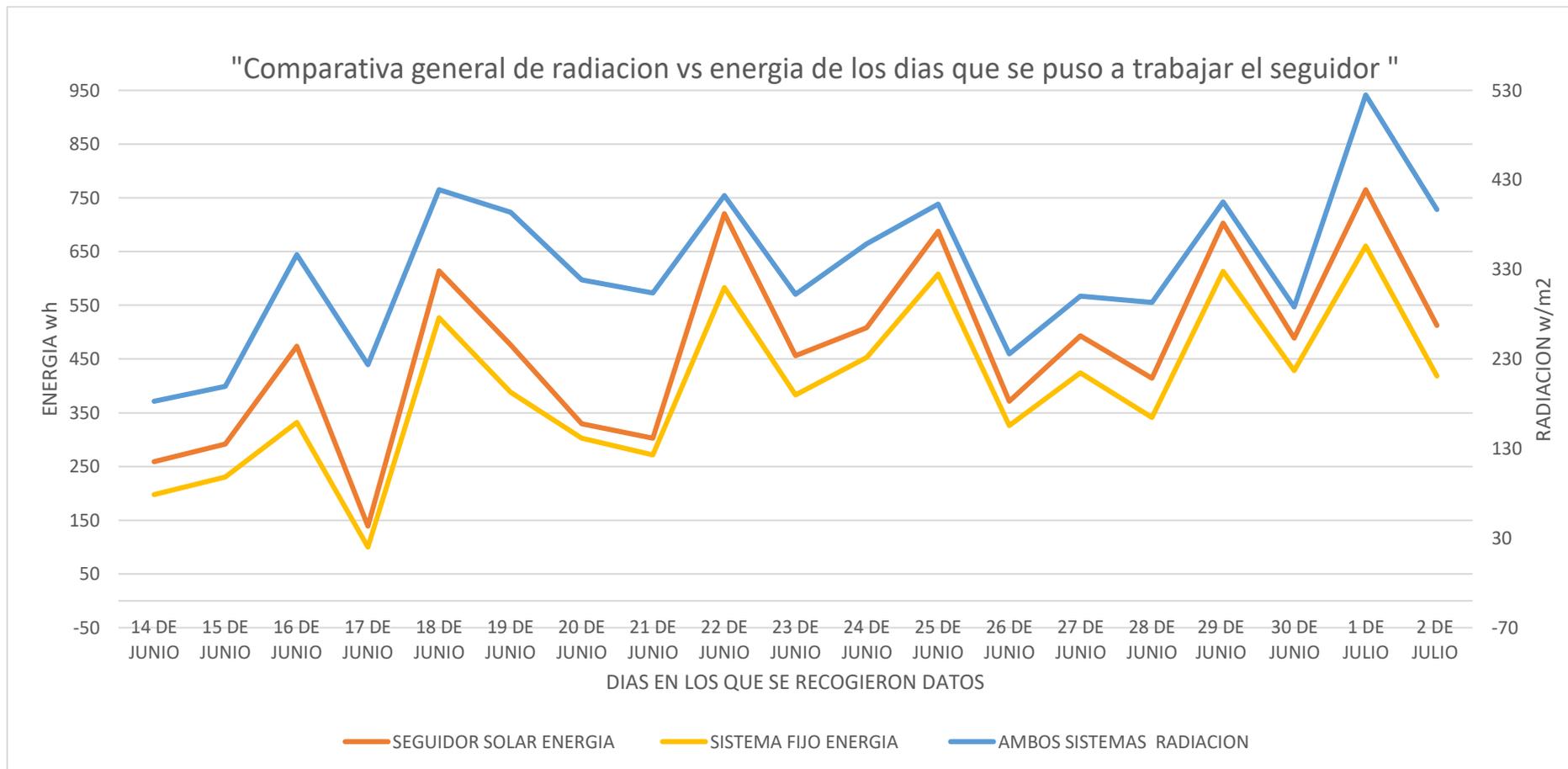


Figura 30 Análisis comparativo general de radiación versus energía de los días que trabajo el seguidor solar de dos ejes y el sistema fijo (Los Autores, 2021)

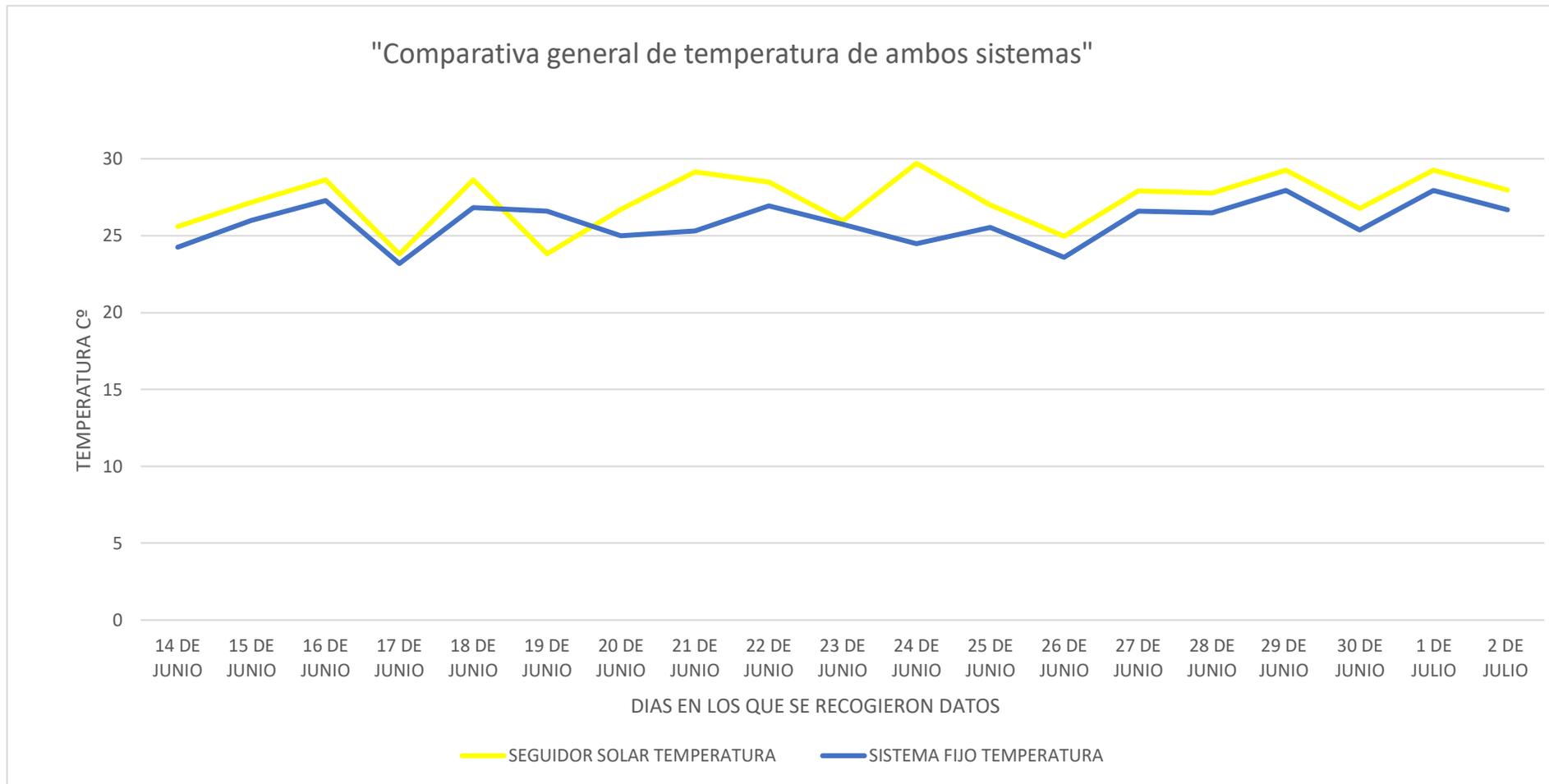


Figura 31 Análisis comparativo de temperatura general diaria promediada del seguidor solar de dos ejes y el sistema fijo. (Los Autores, 2021)

En la figura 31 se muestra la comparación de energía entre ambos sistemas, en el que se muestra que el sistema seguidor de dos ejes produce más energía que el panel que se instaló de manera fija, siendo el día que más energía produjo el 1 de Julio donde se obtiene 765,9 Watts, así mismo el panel solar que se instaló de manera fija produjo más energía en comparación con los demás días siendo esta 660,31 watts.

El 17 de junio es el día que menos energía captó el seguidor en el cual se obtiene 138,99 watts mientras que el panel fijo captó 100,02 watts. Para determinar en porcentaje de rendimiento entre ambos sistemas se utilizó la siguiente fórmula.

$$\%Diferencia = \frac{Energias - Energiapf}{Energiapf} * 100\%$$

Donde *energias* es la energía que capta el seguidor solar mientras que *Energiapf* es la energía. Para esto, se obtiene los datos de la tabla 7.

Datos:

Energias=9838,35 watts

Energiapf=8326,18 watts

Reemplazando en la ecuación tenemos:

$$\%Diferencia = \frac{9838,35 - 8326,18}{8326,18} = 0,1816$$

$$\%Diferencia = 0,1816 * 100\% = 18,16\%$$

Por lo tanto, queda demostrado que el seguidor solar de dos ejes instalado en los predios del campus universitario ULEAM es 18,16% más eficiente que un panel solar instalado de manera estática. De esta manera queda aceptada la hipótesis planteada en la pág. 21.

En la figura 32 donde se muestra gráficamente la comparación de la temperatura de los módulos se observa que el sistema seguidor solar registra una temperatura más alta que el sistema fijo. Este comportamiento puede explicarse debido a que el seguidor solar produce mayor cantidad de energía y el trabajo realizado por este provoca que la temperatura sea un poco más elevada. Uno punto importante a exponer es la condición climática presentada en los días en los que ambos sistemas estuvieron trabajando, debido

a que existieron varios días nublados y otros donde la intensidad del sol fue relativamente media baja provocó que los paneles solares no trabajaran en su máxima capacidad.

En cuanto a porcentajes de ambos sistemas representados gráficamente en la figura 32 se observa que están en intervalos de 24 a 30 °C. en el que se muestra que el seguidor solar el día 24 de junio alcanza una temperatura promedio de 29,71 °C. mientras que el sistema fijo alcanza una temperatura promedio de 24,71. Así mismo se observa que el 17 de junio el seguidor solar alcanza una temperatura promedio de 23,8 °C mientras que el sistema fijo llega a 23,19 °C existiendo poca diferencia entre ambos.

4.3 Factibilidad económica

Producir energía eléctrica a través de la energía solar fotovoltaica implica varios y múltiples costes entre ellos la mano de obra y de materiales; estos aún siguen siendo elevados debido a que se producen a mediana escala, sin embargo, se estima que en los próximos años los costes de producción disminuyan.

El propósito de este apartado es determinar si al colocar seguidores solares en la ciudad de Manta es factible y su coste es compensado con la energía que producen los mismos, si se compara con los costes de instalación de un sistema solar ubicado de manera fija. Para aquello se desarrolla un ejemplo de un sistema solar que se muestra a continuación.

Se tiene un sistema solar off grid de 3kw. Se toma en cuenta un sistema fijo y un sistema móvil, para esto se tiene 2 presupuestos iniciales: el del sistema convencional con \$3340.6 y el presupuesto con los seguidores solares de \$3929.7

Analizando la diferencia que existen en cuanto rendimiento entre ambos sistemas se podría determinar la factibilidad económica, es decir si los costos de inversión compensan a lo que se genera.

Para analizar si el proyecto es económicamente viable se toma como ejemplo una propuesta para instalar un sistema solar OFFGRID de 3KW con un total de \$3010.6 (cotización desde china con envío, anexo 3), el análisis se realiza para 25 años. Es importante destacar que para adaptar el diseño del seguidor solar es necesario cambiar los motores y la estructura teniendo un presupuesto de \$539.1 (Ver anexo 4). El mantenimiento de los seguidores es mínimo: revisión de baterías y motores, limpieza de los sensores y los paneles solares, lubricación del sistema móvil, para este análisis se

estimara un mantenimiento de 2 veces al año por \$40 y un fondo de reserva para reparaciones, la instalación del sistema tiene un precio de \$330.

El sistema solar cuenta con 6 paneles de 410Wp, con una capacidad total de 2460 Wp para ambos sistemas.

Por medio de la ficha técnica (Ver anexo 5) de los paneles solares y la curva radiación, potencia y voltaje, se calcula la energía que los paneles producirán si la radiación promedio es de 406.67 W/m² (datos de la NASA), y luz solar diaria de 12 horas.

Se tiene la siguiente ecuación:

$$Ed = PR * np * t$$

En donde:

Ed = energía diaria producida.

PR = potencia del panel solar según la curva radiación-potencia

np = el número de paneles instalados.

t = las horas del sol al día.

Desarrollando la ecuación se obtiene:

$$150W * 6 * \frac{12}{dia} = 10.8 \frac{kWh}{dia}$$

Del resultado obtenido anteriormente se multiplica por los 365 días del año para obtener una base promedio anual.

$$10.8 \frac{kWh}{dia} * \frac{365 dias}{1 año} = 4088 \frac{kWh}{año}$$

Entonces, se estima una producción anual de 4088 kWh/año.

Con el seguidor solar se obtiene un 18.16% de ganancia en la producción diaria, sube de 10.8kW/h a 12.76kW/h.

$$10.8 \frac{kW}{h} * 1.1816 = 12.76 \frac{kW}{h}$$

La producción anual aumenta a:

$$12.76 \frac{kW}{h} * 365 = 4657.4 \frac{kW}{h}$$

El precio del kW/h en el Ecuador es de 9.73 ctvs., se estima suba el 1.7% por año revisando los pliegos tarifarios de los últimos 10 años (Bello Aldana & Paez Fino, 2018)

Con estos datos se realiza un balance anual con la inversión inicial, los gastos de mantenimiento, perdidas de potencia, precio de energía y fondo de reparaciones, después se estima buscar el Valor Actual Neto y la Tasa Interna de Retorno para analizar si es económicamente viable (Solartradex, 2013) (Macías Centeno et al., 2018)

Se calcula el Valor Actual Neto de la inversión y la Tasa Interna de Retorno (TIR), donde el VAN determina la rentabilidad de un proyecto en base a los flujos de efectivo netos y la tasa interna de retorno corresponde a aquella tasa de descuento que hace el VAN igual a cero.

Formulas VAN y TIR

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t} = -I_0 + \frac{F_1}{(1+k)} + \frac{F_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1+k)^n}$$

Donde:

VAN = valor anual neto del proyecto

I_0 = inversión inicial del proyecto.

n = el número de años para los que se realiza el estudio.

F_1, F_2, F_n = es el flujo de dinero de cada periodo.

k = la tasa de interés.

Para calcular la tasa interna de retorno la fórmula es parecida.

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+TIR)^t} = -I_0 + \frac{F_1}{(1+TIR)} + \frac{F_2}{(1+TIR)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1+TIR)^n} = 0$$

Donde TIR se calcula y se compara con la tasa de interés de la formula principal del VAN, si es mayor a 0 el proyecto es viable.

Realizando el análisis del sistema convencional tenemos como VAN \$2221.46 y un TIR de 9.56%(figura 33) mientras que el sistema con seguidor solar tenemos VAN \$2012.13 y un TIR de 8.44%.(figura34) (Anexos 7).

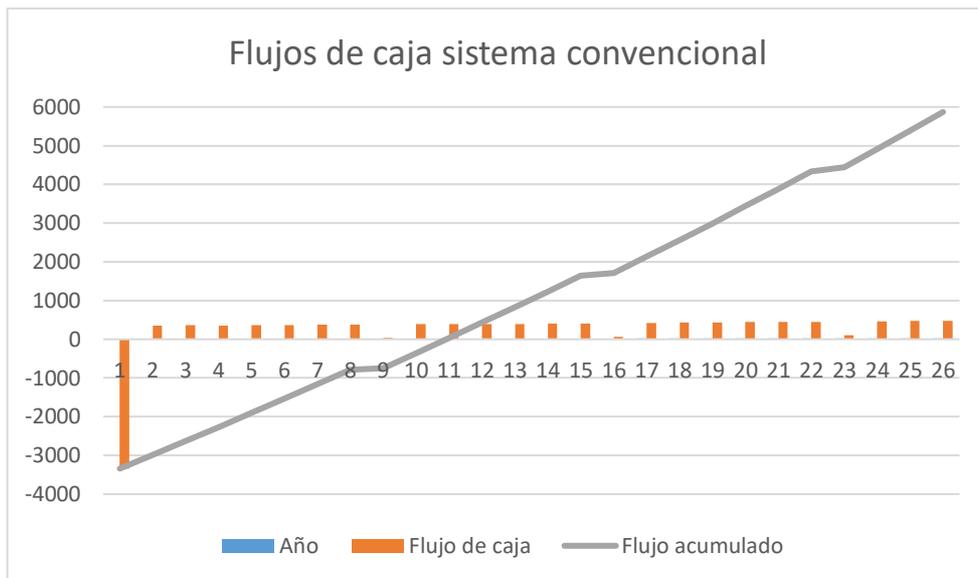


Figura 33. Flujo de caja del análisis sistema fijo (Los Autores, 2021)

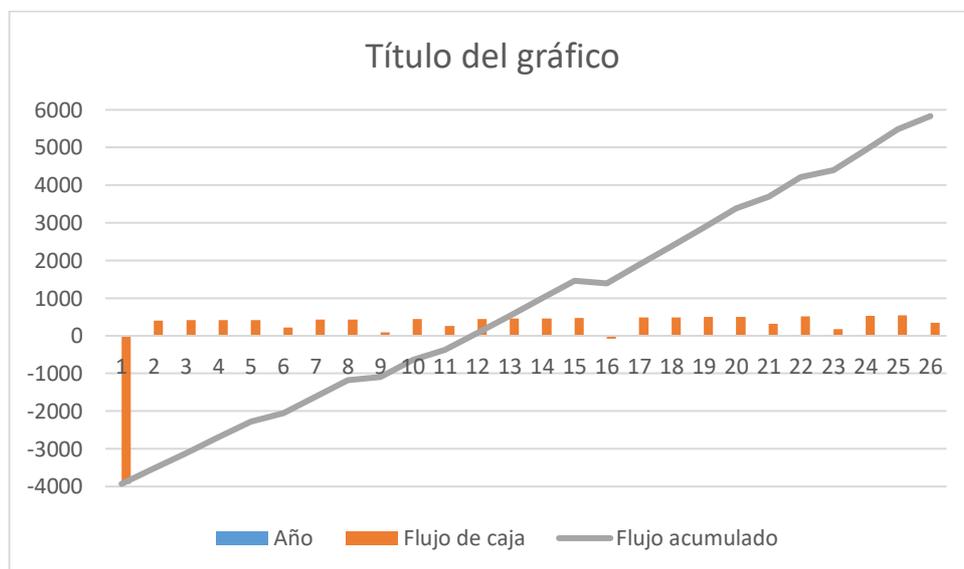


Figura 34. Flujo de caja del análisis del seguidor solar (Los Autores, 2021)

Una vez realizado en análisis técnico-económico se llegan a las siguientes conclusiones.

- Los seguidores solares captan más energía solar si se compara con un sistema fijo, técnicamente el proyecto es viable, ya que se obtiene de un 18.16% más de producción de energía. Sin embargo, es importante recalcar que nuestro país está ubicado en la zona ecuatorial, lo que provoca que los rayos del sol incidan de manera perpendicular, por esta razón la diferencia de producción de energía es baja.
- Actualmente el estudio de seguidores solares sigue siendo temas de investigación, apostar por energías que no contaminan es aún todo un reto, por esta razón los

productos de ensamblaje, mano de obra, mantenimiento, entre otros gastos que se estiman necesarios son aun elevados debido a que no existe mucha demanda en el mercado tanto nacional como internacional. Realizando el ejemplo anteriormente mostrado determinamos que económicamente el proyecto no es viable, ya que se necesita de varios años de funcionamiento para recuperar la inversión.

CONCLUSIONES

Al finalizar la presente investigación que tuvo como objetivo realizar un análisis comparativo técnico-económico entre paneles solares instalados de manera fija y seguidores solares se han determinado las siguientes conclusiones:

- Instalar paneles solares de tal manera que se aproveche al máximo la radiación emitida por el sol es uno de los factores primordiales que se debe tomar en cuenta en los estudios previos, debido a que la trayectoria del sol es diferente en cualquier parte del mundo, así mismo al diseñar estructuras mecánicas que permiten el movimiento de un panel solar se debe analizar tanto las condiciones climáticas y el tipo de movimiento que se designa realizar.
- Al diseñar seguidores solares de manera artesanal se debe examinar los materiales de construcción mismos que deben tolerar un peso y fenómenos naturales impredecibles, así como también el mantenimiento adecuado para su correcto funcionamiento.
- La corriente, tensión y temperatura generada por un seguidor solar y por un panel fijo es relativamente diferente, de acuerdo a los datos obtenidos mediante sensores instalados en cada uno de ellos, mismos que fueron receptados en un tiempo determinado y bajo las mismas condiciones.
- De acuerdo con el porcentaje de producción de energía captado por el seguidor solar de dos ejes y al compararlo con estudios realizados se establece que está dentro del rango esperado, a diferencia de países que se encuentran en latitudes superiores a los trópicos, donde usualmente el porcentaje varía hasta en un 45%, hace que el uso de estos dispositivos sean rentables. Una vez obtenido los datos por el tiempo determinado que se pusieron a trabajar ambos sistemas se observó que el seguidor solar de dos ejes posee una diferencia de rendimiento a favor de un sistema fijo, el cual es de alrededor 18% donde se estima que dicho porcentaje se debe a que Ecuador está situado en la línea ecuatorial donde los rayos del sol caen de manera casi perpendicular con poca variación a lo largo del año, lo que no sucede en otros países donde la diferencia se nota tanto en la inclinación del sol, la temperatura y las horas de sol diarias.

- En cuanto a la temperatura que produce ambos sistemas existe una diferencia que varía de 1°C a 3°C a favor del panel fijo, se debe a que el seguidor solar recibe mayor radiación solar directa, que hace que aumente la temperatura, este, al tener mayor potencia aumenta la corriente, haciendo así que la disipación de calor aumente y este a su vez aumenté la temperatura del panel solar.
- El seguidor solar es más eficiente que un panel solar fijo, pero los gastos de producción asociados y comparados a los gastos realizados por la instalación y montaje de un panel fijo no se compensan, técnicamente visto a gran escala es viable, sin embargo económicamente no porque se estima varios años para recuperar la inversión.

RECOMENDACIONES Y LINEAS FUTURAS

Ecuador debe encaminar investigaciones sobre este tipo de nuevas tecnologías, darle prioridad a la generación eléctrica mediante energía solar fotovoltaica, aprovechar la ubicación geográfica en la que nos encontramos y promover la utilización de paneles solares y a su vez hacer hincapié en la diferencia de rendimiento entre sistemas de seguimiento solar y sistemas fijo.

En cuanto a la investigación realizada se recomienda analizar e investigar sistemas de enfriamiento que conlleve a refrescar el sistema seguidor solar y realizar un análisis donde se demuestre si al instalar sistemas de enfriamientos en determinadas horas del día, el rendimiento de ambos sistemas aumenta o se mantiene, considerando ubicación geográfica de instalación, así como también la situación climática.

Realizar un algoritmo de seguimiento solar basado en la hora del día (seguidores solares con programación astronómica) lo que permitirá que el sistema seguidor solar se mueva al largo del día gracias a las predicciones climáticas, calendarios lunares etc. En Ecuador solo existen dos estaciones climáticas (invierno y verano) a lo largo de todo el año los días duran 12 horas, al desarrollar prototipo como estos podría obtener mayor captación de energía en días nublados.

Realizar mantenimientos periódicos de ambos equipos, que se oriente al mejoramiento de ambos sistemas.

BIBLIOGRAFIA

- Agencia Espacial Civil Ecuatoriana. EXA. (2008). *Informe Hiperión*. 50. <http://www.exa.ec/>
- Aguilar, F., Aledo, S., & Quiles, P. (2016). Experimental study of the solar photovoltaic contribution for the domestic hot water production with heat pumps in dwellings. *Applied Thermal Engineering*, 101, 379–389. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.127>
- Aguirre, A. (2008). Célula solar ultra delgada para nanogadgets . In *GSTRIATUM*. <https://gstriatum.com/2008/03/05/celula-solar-ultra-delgada-para-nanogadgets/>
- Al-Mohamad, A. (2011). Efficiency improvements of photo-voltaic panels using a Sun-tracking system. *Applied Energy*, 79(3), 345–354. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2003.12.004>
- Alvarado, N., Vaquera, E., Román, D. A., & ... (2016). Propuesta de diseño de un seguidor solar de dos y tres ejes. *Ciencia, Ingeniería y Desarrollo*, 1(2), 208–213.
- Arroyo, F., & Luis, M. (2019). Análisis de la variación de las emisiones de CO₂ y posibles escenarios al 2030 en Ecuador. *Revista ESPACIOS*, 40 (Nº 13), 18.
- Badawy, W. A. (2015). A review on solar cells from Si-single crystals to porous materials and Quantum dots. *Journal of Advanced Research*, 6(2), 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2013.10.001>
- Badii, M. H., Guillen, A., & Abreu, J. L. (2016). Energías Renovables y Conservación de Energía. *Revista Daena (International Journal of Good Conscience)*, 11(1), 141–155. <http://bd.univalle.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=fua&AN=116281297&lang=es&site=eds-live>
- Bakos, G. C. (2006). Design and construction of a two-axis Sun tracking system for parabolic trough collector (PTC) efficiency improvement. *Renewable Energy*, 31(15), 2411–2421. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.11.008>

- Balaguer Zueco, S. (2016). *Seguidor Solar De Dos Ejes*. Univesitat Jaume I.
- Baskoutas, S., & Terzis, A. F. (2006). Size-dependent band gap of colloidal quantum dots. *Journal of Applied Physics*, 99(1), 1–5. <https://doi.org/10.1063/1.2158502>
- Bèer, K. W. (2002). *Solar Cells*. Chemistry Encyclopedia. <http://www.chemistryexplained.com/Ru-Sp/Solar-Cells.html>
- Bekakra, Y., Zellouma, L., & Serhoud, H. (2019). Design and Implementation of a Solar Tracker System with Dual Axis for Photovoltaic Panels in El Oued Region of Algeria. *Design and Implementation of a Solar Tracker System with Dual Axis for Photovoltaic Panels in El Oued Region of Algeria*, 19–24. <https://doi.org/10.1109/ICSRESA49121.2019.9182599>
- Chopra, K. L., Paulson, P. D., & Dutta, V. (2004). Thin-film solar cells: An overview. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 12(2–3), 69–92. <https://doi.org/10.1002/pip.541>
- Correa Alvares, F. P., González González, D., & Pacheco Alemán, J. G. (2016). ENERGÍAS RENOVABLES Y MEDIO AMBIENTE: SU REGULACIÓN JURÍDICA EN ECUADOR. *Scielo*, 8(3). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202016000300024
- Deng, X., & Schiff, E. A. (2003). Amorphous silicon based solar cells and modules. *Geliotekhnika*, 1–3, 130–139.
- Dias, R., Vasquez, D., Aleman, K., Melara, A., & Romero, E. (2017). *Comparacion del rendimiento entre un panel solar fijo y uno con sistema de seguidor solar*.
- Díaz, O., Cano, M., & Murphy, F. (2017). Desarrollo de energías renovables. Contexto latinoamericano y el caso argentino. In *Energía y Recursos Naturales* (Vol. 1).
- Diner, F. (2011). The analysis on photovoltaic electricity generation status, potential and policies of the leading countries in solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 713–720. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.026>
- Eficiencia energética y energías renovables de EE. UU. (2017). *Organic Photovoltaics Research*. Department of Energy. <https://www.energy.gov/eere/solar/organic->

photovoltaics-research

- Fadil, S., Capar, A. C., & Caglar, K. (2013). Two axis solar tracker design and implementation. *ELECO 2013 - 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, 554–557. <https://doi.org/10.1109/eleco.2013.6713907>
- Fadil, S., Çapar, A. C., & Lar, K. Ç. A. (n.d.). *Diseño e implementación de seguidores solares de dos ejes Micro controlador*. 554–557.
- Flores, O., Hernández, A., Huitzil, I., Martos, C., & Díaz, A. (2014). Clínica Sustentable con Seguidor Solar. *Ciencias de La Ingeniería y Tecnología*, 5(2), 20–32.
- Guardado, D., & Rivera, V. (2012). *Implementación de seguidor solar en dos ejes para el Sistema Fotovoltaico de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la UES*. http://ri.ues.edu.sv/2045/1/Implementación_de_seguidor_solar_en_dos_ejes_para_el_Sistema_Fotovoltaico_de_la_Escuela_de_Ingeniería_Eléctrica_de_la_UES.pdf
- Hanania, J., & Stenhouse, K. (2015). *Band gap - Energy Education*. Energy Education. https://energyeducation.ca/encyclopedia/Band_gap
- INAOE. (2016). *Celdas solares de tercera generación* -. <https://www.youtube.com/watch?v=4jQX51CkKIw>
- Ingeniería Mecafenix. (2017). *Motor paso a paso ¿que es y como funciona?* La Enciclopedia de La Ingeniería . <https://www.ingmecafenix.com/electricidad-industrial/motor-paso-a-paso/>
- IRENA. (2019). Renovables representan hoy una tercera parte de la capacidad energética global. In *Renovables representan hoy una tercera parte de la capacidad energética global* (Vol. IEO2019). https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Press-Release/2019/Apr/IRENA_Capacity-Growth-2018_Press-Release-Spanish.pdf?la=en&hash=E47EA2EFB7D1049EECDCC402F4FD346EDADB00DA
- Jalón Villón, R. A., & Herrera Cruz, E. A. (2019). Análisis de eficiencia de un seguidor solar a dos ejes para fines energéticos. In *Repositorio de la Universidad Estatal de Milagro*.

- Jimenez, J. (2016). *Diseño de un seguidor solar automatico para un arreglo basico de paneles fotovoltaicos* (Vol. 9, Issue 2) [Fundacion Universida de America]. <https://doi.org/10.5151/cidi2017-060>
- Kannan, N., & Vakeesan, D. (2016). Solar energy for future world: - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1092–1105. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.022>
- Kivrak, S., Gunduzalp, M., & Dincer, F. (2012). Theoretical and experimental performance investigation of a twoaxis solar tracker under the climatic condition of Denizli, Turkey. *Przeglad Elektrotechniczny*, 88(2), 332–336.
- Koussa, M., Cheknane, A., Hadji, S., Haddadi, M., & Noureddine, S. (2011). Measured and modelled improvement in solar energy yield from flat plate photovoltaic systems utilizing different tracking systems and under a range of environmental conditions. *Applied Energy*, 88(5), 1756–1771. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.002>
- Lewis, N. S. (2007). Toward cost-effective solar energy use. *Science*, 315(5813), 798–801. <https://doi.org/10.1126/science.1137014>
- Li, B., Wang, L., Kang, B., Wang, P., & Qiu, Y. (2006). Review of recent progress in solid-state dye-sensitized solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(5), 549–573. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2005.04.039>
- Louis, J. R., Shanmugham, S., Gunasekar, K., Atla, N. R., & Murugesan, K. (2016). Effective utilisation and efficient maximum power extraction in partially shaded photovoltaic systems using minimum distance-average-based clustering algorithm. *IET Renewable Power Generation*, 10(3), 319–326. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2014.0316>
- Maehlum, M. . (2015). *Which Solar Panel Type is Best? Mono- vs. Polycrystalline vs. Thin Film - Mep Cell*. MEP CELL. <https://www.mepcell.com/which-solar-panel-type-is-best-mono-vs-polycrystalline-vs-thin-film/?lang=en>
- Martin, R. (2016). *Células solares de teluro de cadmio logran un nuevo récord de eficiencia* | MIT Technology Review. MIT Technology Review . <https://www.technologyreview.es/s/5648/celulas-solares-de-teluro-de-cadmio->

logran-un-nuevo-record-de-eficiencia

- Mehrtash, M., Quesada, G., Dutil, Y., & Rousse, D. (2012). Performance Evaluation of Sun Tracking Photovoltaic Systems in Canada. *20th Annual International Confernece on Mechanical Engineering*, 18–21.
- MIT. (2015). Comparative studies on different generation solar cells technology. In *International Conference on Environmental Aspects of Bangladesh* (Issue March). Massachusetts Institute of technology. <http://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2015/05/MITEI-The-Future-of-Solar-Energy.pdf>
- Mohammad Bagher, A., Vahig Abadi, M., & Mohsen, M. (2015). Types of Solar Cells and Application. *American Journal of Optics and Photonics*, 3(5), 94. <https://doi.org/10.11648/j.ajop.20150305.17>
- Mohanta, P. R., Patel, J., Bhuvu, J., & Gandhi, M. (2015). A Review on Solar Photovoltaics and Roof Top Application of It. *International Journal of Advance Research in Engineering, Science & Technology*, 2(4), 1–4. https://www.researchgate.net/publication/275560441_A_Review_on_Solar_Photo_voltaics_and_Roof_Top_Application_of_It
- Molina Gómez, M. de los Á. (2007). *Dos vías para la energía solar – Academia de Ciencias de la Región de Murcia*. Academia de Ciencias de La Region de Murcia. <https://www.um.es/acc/dos-vias-para-la-energia-solar/>
- Mondol, J. D., Yohanis, Y. G., & Norton, B. (2007). The impact of array inclination and orientation on the performance of a grid-connected photovoltaic system. *Renewable Energy*, 32(1), 118–140. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.05.006>
- Niv, A., Abrams, Z. R., Gharghi, M., Gladden, C., & Zhang, X. (2012). Overcoming the bandgap limitation on solar cell materials. *Applied Physics Letters*, 100(8). <https://doi.org/10.1063/1.3682101>
- NREL. (2017a). *National Renewable Energy Laboratory - National Center for Photovoltaics. Research Cell Efficiency Records*.
- NREL. (2017b). *Photovoltaics Research and Development* . Department of Energy.

<https://www.energy.gov/eere/solar/photovoltaics-research-and-development>

Observatorio Astronómico de Quito. (2015). *Solsticio de Cáncer*. Escuela Politécnica Nacional. <https://oaq.epn.edu.ec/index.php/noticias-2016/158-solsticio-junio2016>

Oh, S. J., Burhan, M., Ng, K. C., & Kim, Y. (2015). *Desarrollo y análisis de rendimiento de un seguidor solar de dos ejes para fotovoltaica concentrada. i.*

Ortúzar, N. (Oficina D. E. Y. P. agrarias/ODEPA). (2013). Panorama de las Energías Renovables No Convencionales. ODEPA, 1–10. <http://www.odepa.cl/odepaweb/publicaciones/doc/11395.pdf>

Papiewski, J. (2018). *What Kind of Light Does a Solar Cell Need?* Sciencing. <https://sciencing.com/can-solar-batteries-charge-using-incandescent-light-7189.html>

Pelayo López, J. A., Luna Soto, A., Bernabe Ramos, F., & Guzmán Flores, B. (2018). Comparativa de la eficiencia entre un sistema fotovoltaico con seguimiento solar y un sistema fotovoltaico fijo / Comparison between a photovoltaic solar tracker efficiency and a fixed photovoltaic system. *CIBA Revista Iberoamericana de Las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 7(13), 105–129. <https://doi.org/10.23913/ciba.v7i13.76>

Perez, L. W. S. (2019). Estudio comparativo entre un panel fotovoltaico fijo y móvil de 50w policristalinos y su incidencia en la captación de energía solar en la ciudad de Ambato. In *Repo.Uta.Edu.Ec.* <http://repo.uta.edu.ec/bitstream/handle/123456789/5301/Mg.DCEv.Ed.1859.pdf?sequence=3>

Ponce Jara, M. A., Velásquez Figueroa, C., Tonato Peralta, D., & Paredes Morillo, G. (2020). <http://dx.doi.org/10.35381/r.k.v5i2.1072>. V.

Posso, F., Acevedo, J., & Hernández, J. (2014). El impacto económico de las energías renovables. *Aibi Revista de Investigación, Administración e Ingeniería*, 2, Num. 2.(February 2016), 22–26. <https://doi.org/10.15649/2346030x.526>

Roca, J. (2019). *La capacidad solar mundial superó los 500 GW en 2018*. El Periódico

de La Energia.Com. <https://elperiodicodelaenergia.com/la-capacidad-solar-mundial-supero-los-500-gw-en-2018/>

Sengupta, M., Habte, S., Kurtz, S., Dobos, A., Wilbert, S., Lorenz, E., Stoffel, T., Renne, D., Gueymard, C., Myres, D., Wilcox, S., Blanc, P., & Perez, R. (2012). General Solar Position Calculations. In *World Renewable Energy Forum (WREF)* (Vol. 76, Issue September). <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.12.003>

Shafiee, S., & Topal, E. (2009). When will fossil fuel reserves be diminished? *Energy Policy*, 37(1), 181–189. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.08.016>

Sharma, S., Jain, K. K., & Sharma, A. (2015). Solar Cells: In Research and Applications—A Review. *Materials Sciences and Applications*, 06(12), 1145–1155. <https://doi.org/10.4236/msa.2015.612113>

Shi, D., Zeng, Y., & Shen, W. (2015). Perovskite/c-Si tandem solar cell with inverted nanopramids: Realizing high efficiency by controllable light trapping. *Scientific Reports*, 5(July), 1–10. <https://doi.org/10.1038/srep16504>

SolarFirst. (2016). *seguidor solar horizontal de un solo eje, seguidor solar plano de un solo eje*. http://es.pvsolarfirst.com/horizontal-single-axis-solar-tracker_c17

Tinoco, T., Rincón, C., Quintero, M., & Pérez, G. S. (1991). Phase Diagram and Optical Energy Gaps for $\text{CuIn}_y\text{Ga}_{1-y}\text{Se}_2$ Alloys. In *Physica Status Solidi (a)* (Vol. 124, Issue 2). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/pssa.2211240206>

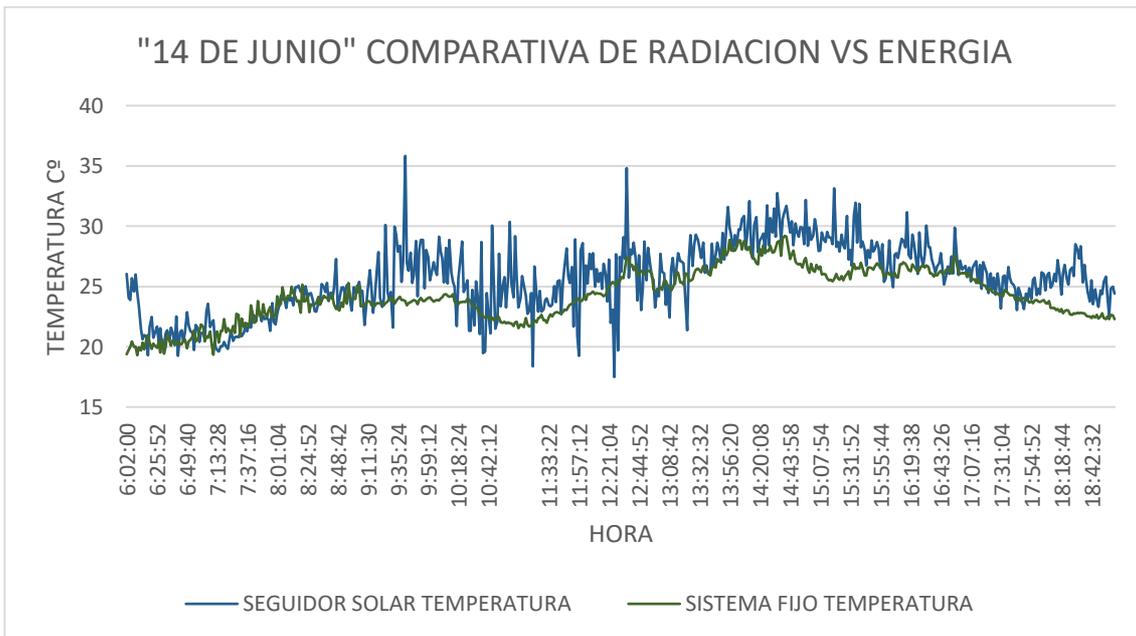
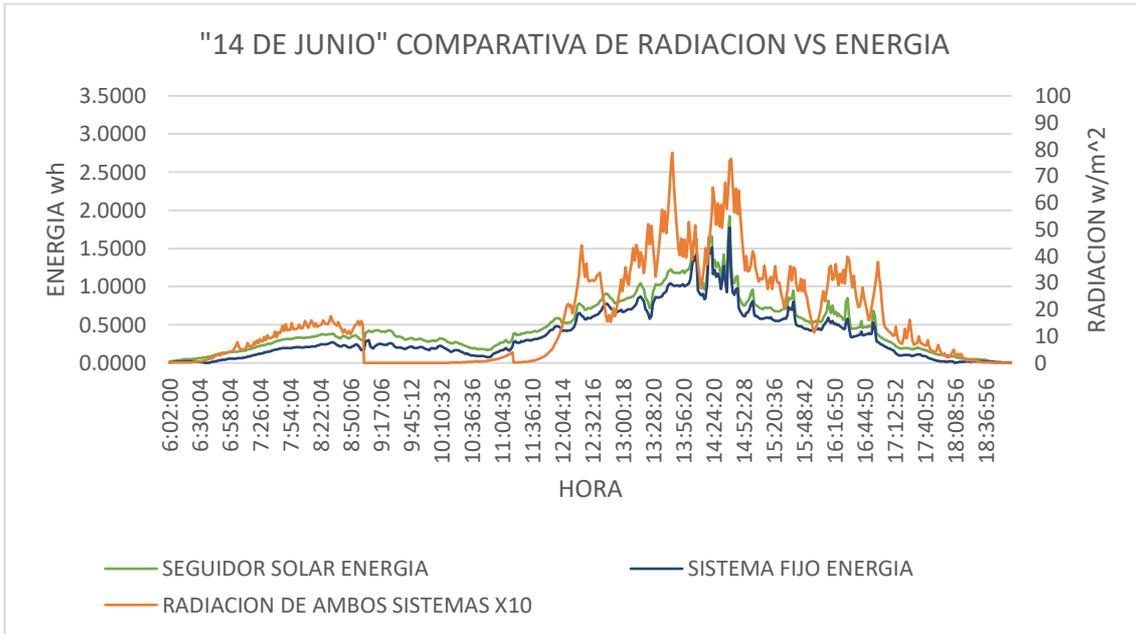
Verma, A., & Singhal, S. (2015). Solar PV Performance Parameter and Recommendation for Optimization of Performance in Large Scale Grid Connected Solar PV Plant-Case Study. *J. Energy Power Sources*, 2(1), 40–53. <https://www.researchgate.net/publication/273773520>

Vieira, R. G., Guerra, F. K. O. M. V., Vale, M. R. B. G., & Araújo, M. M. (2016). Comparative performance analysis between static solar panels and single-axis tracking system on a hot climate region near to the equator. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 672–681. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.089>

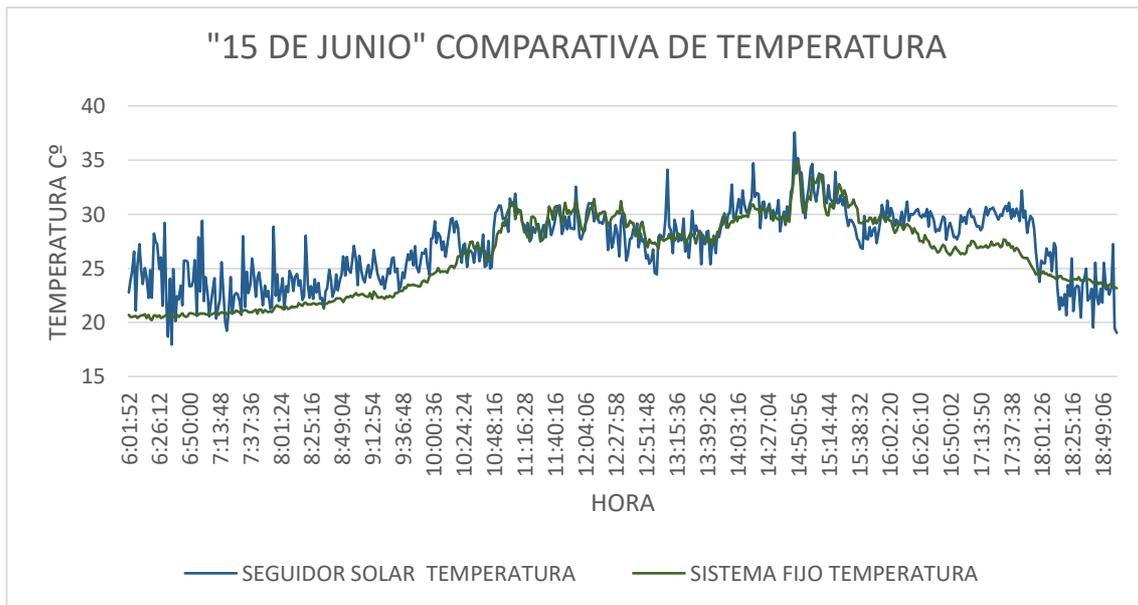
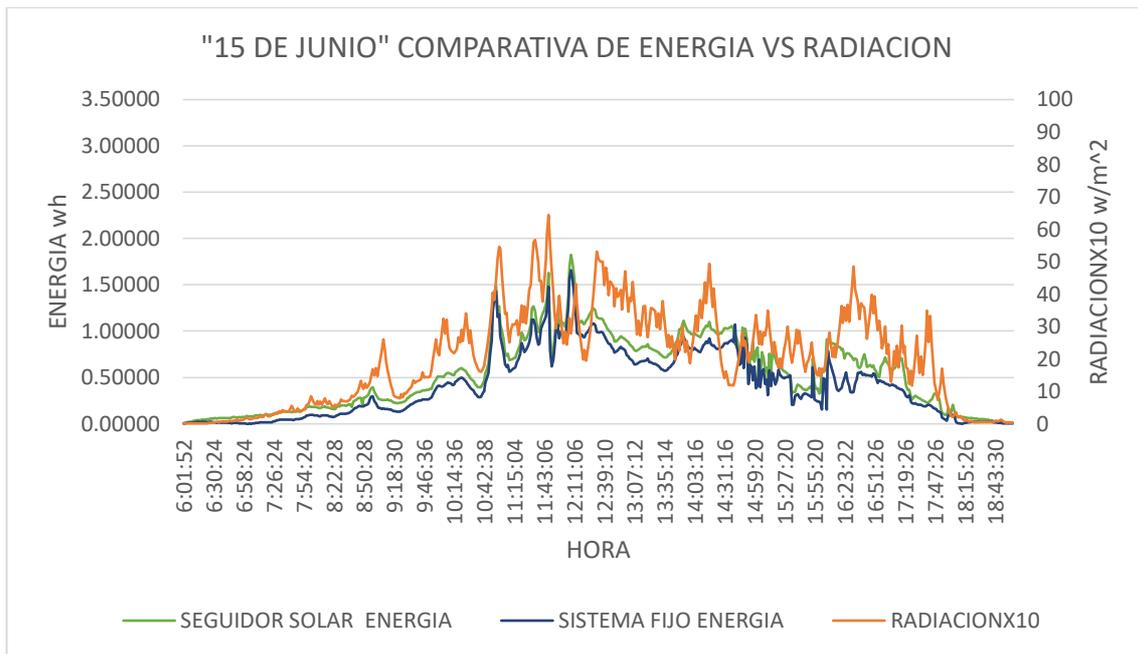
- Viitanen, J., & Halonen, L. (2014). Electrical efficiency study of alternating current and direct current power topologies in office building with integrated photovoltaics in Matlab-Simulink environment. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 6(3). <https://doi.org/10.1063/1.4880775>
- Bello Aldana, A. M., & Paez Fino, D. N. (2018). *ESTUDIO DE VIABILIDAD FINANCIERA DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE PANELES SOLARES PARA PUESTOS DE SALUD EN COLOMBIA* (Issue 21).
- Macías Centeno, J. E., Valarezo Molina, L. A., & Loor Castillo, G. (2018). Los Diferentes Costos que Tiene la Energía Eléctrica en el Ecuador Considerando los Cambios de la Estructura Actual. *Revista de Investigaciones En Energía, Medio Ambiente y Tecnología: RIEMAT ISSN: 2588-0721*, 3(2), 29. <https://doi.org/10.33936/riemat.v3i2.1628>
- Solartradex. (2013). *Análisis económico de un proyecto de autoconsumo solar*. - Solartradex. <https://solartradex.com/blog/analisis-economico-de-un-proyecto-de-autoconsumo-solar/>

ANEXOS

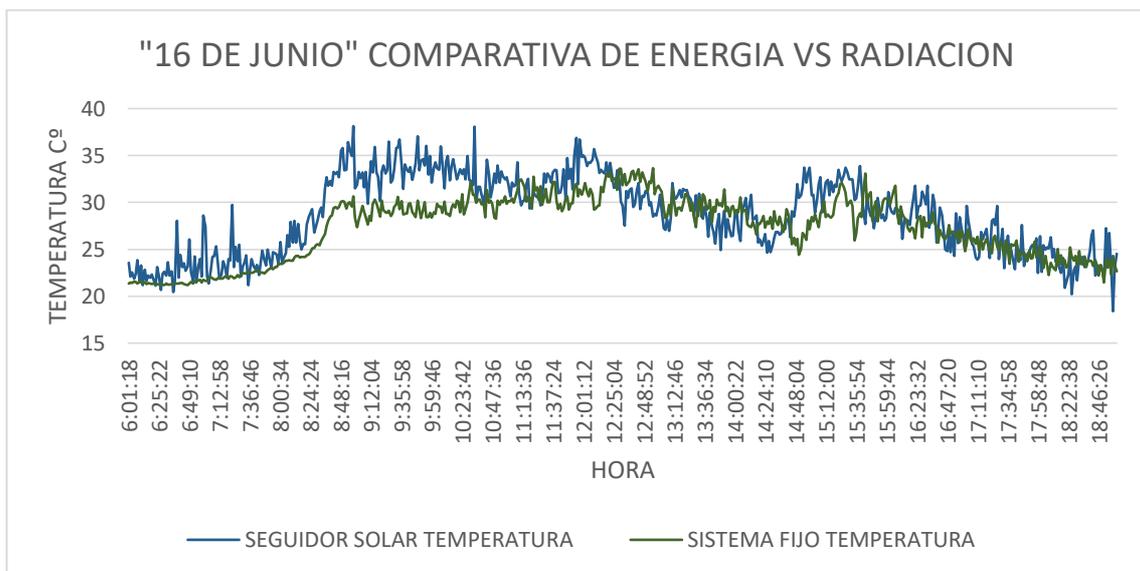
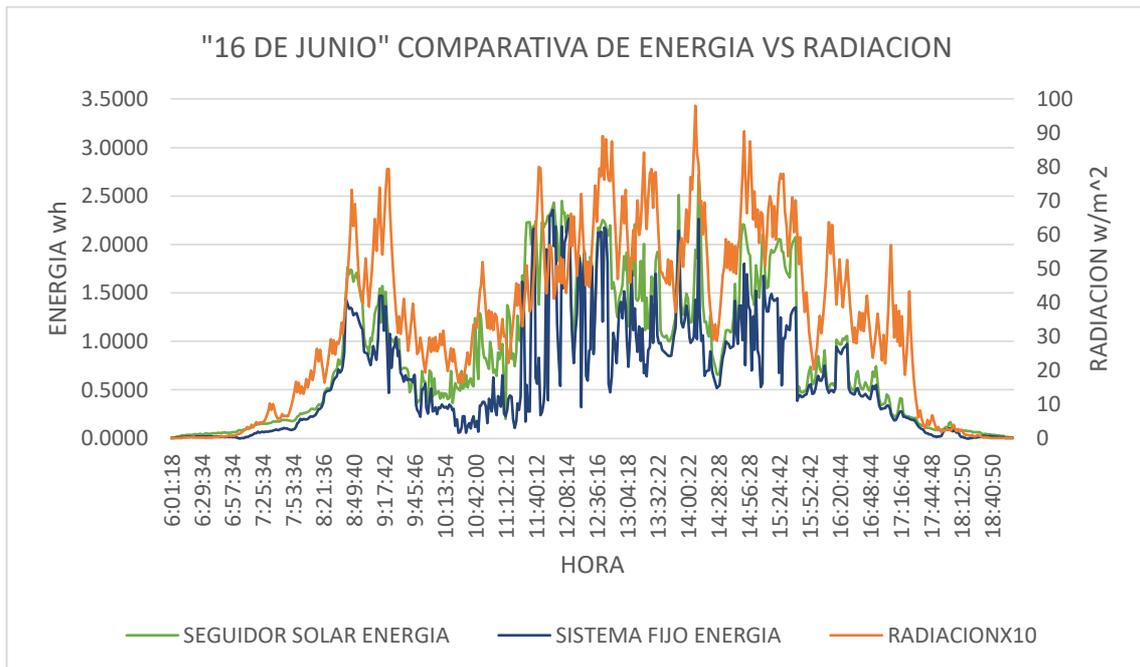
Anexo 1. Graficas radiación vs energía y temperatura de ambos sistemas



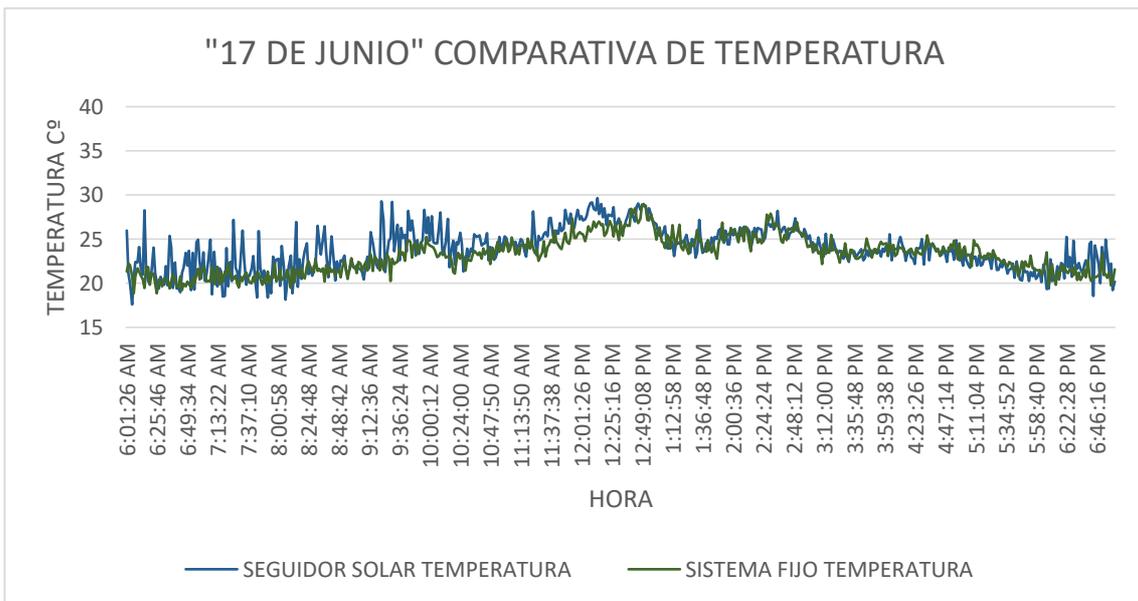
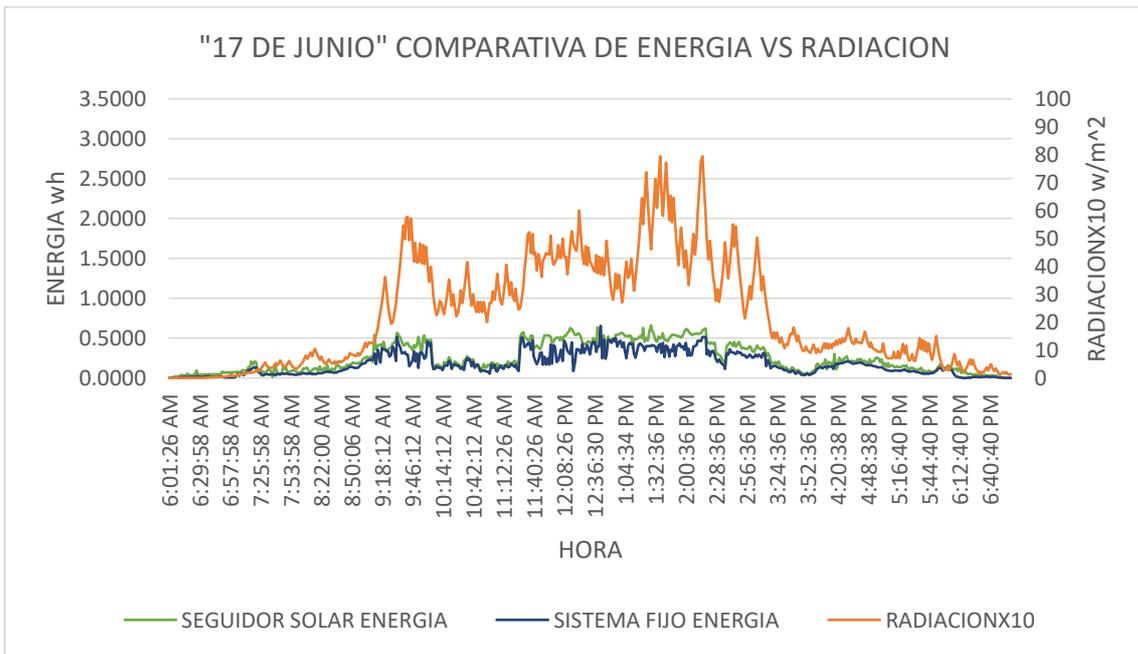
15 de junio



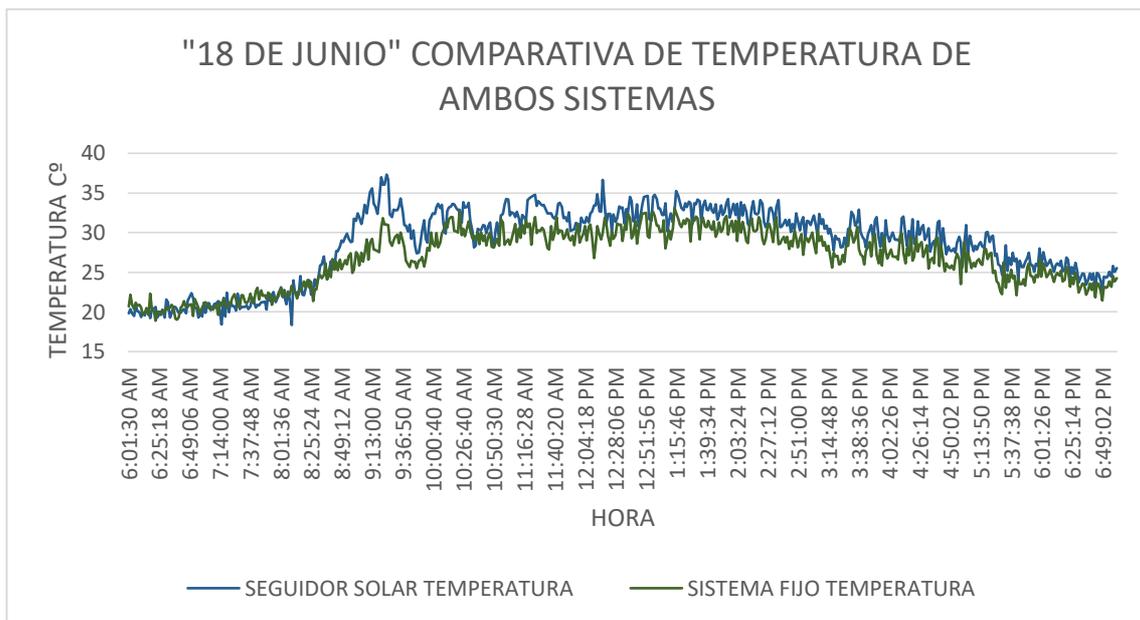
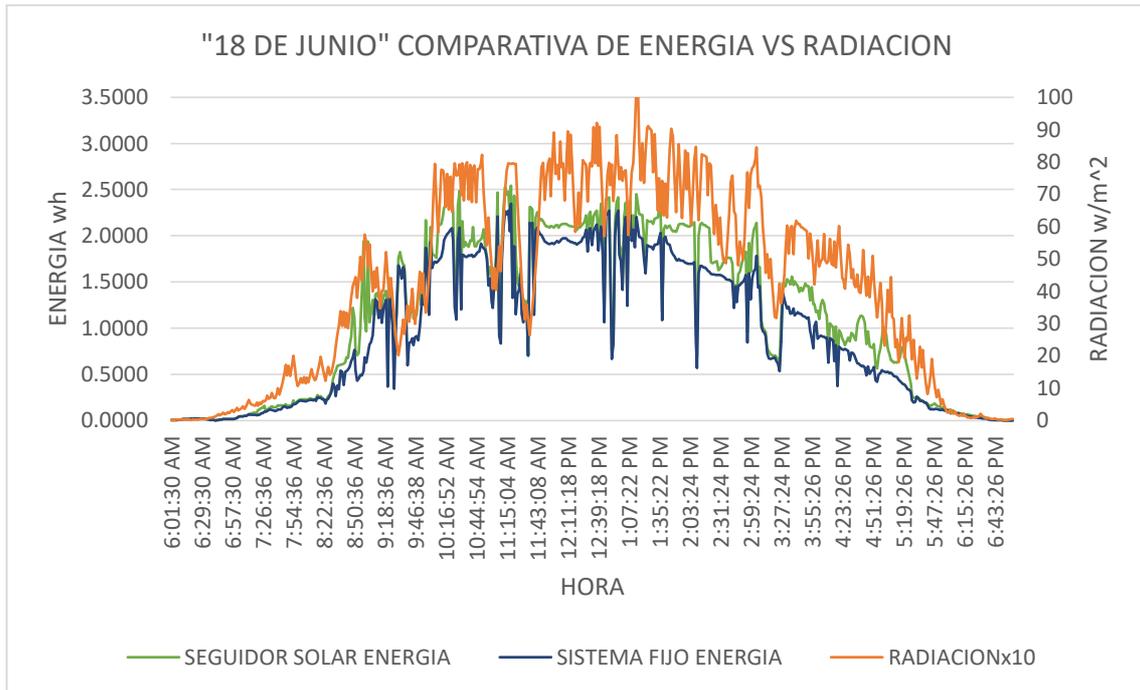
16 de junio



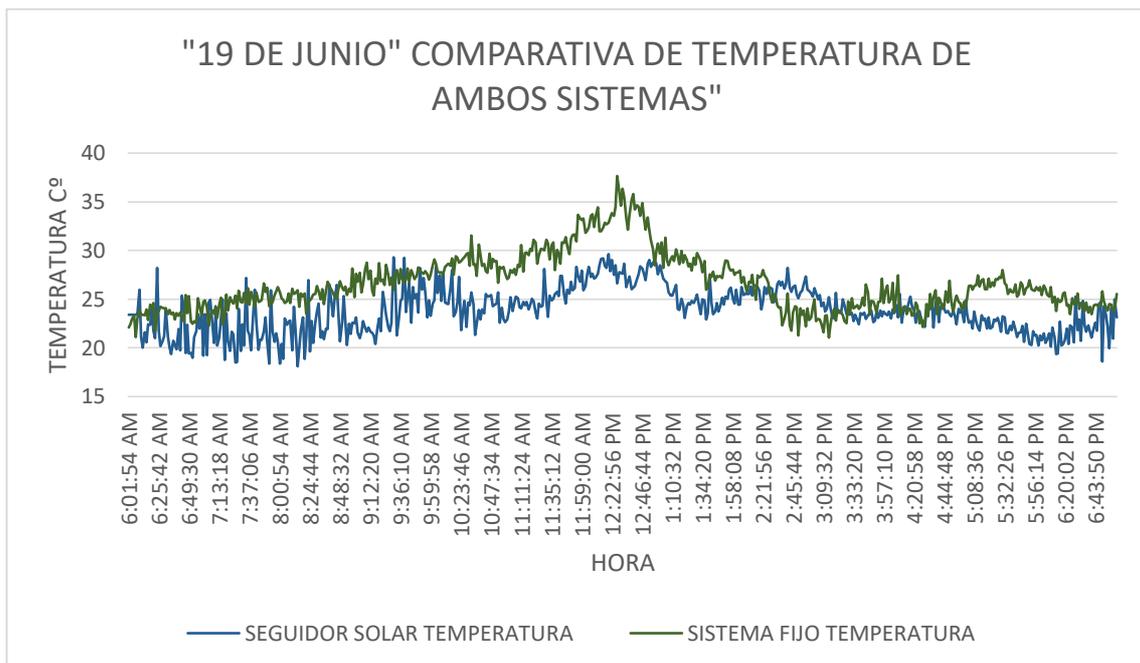
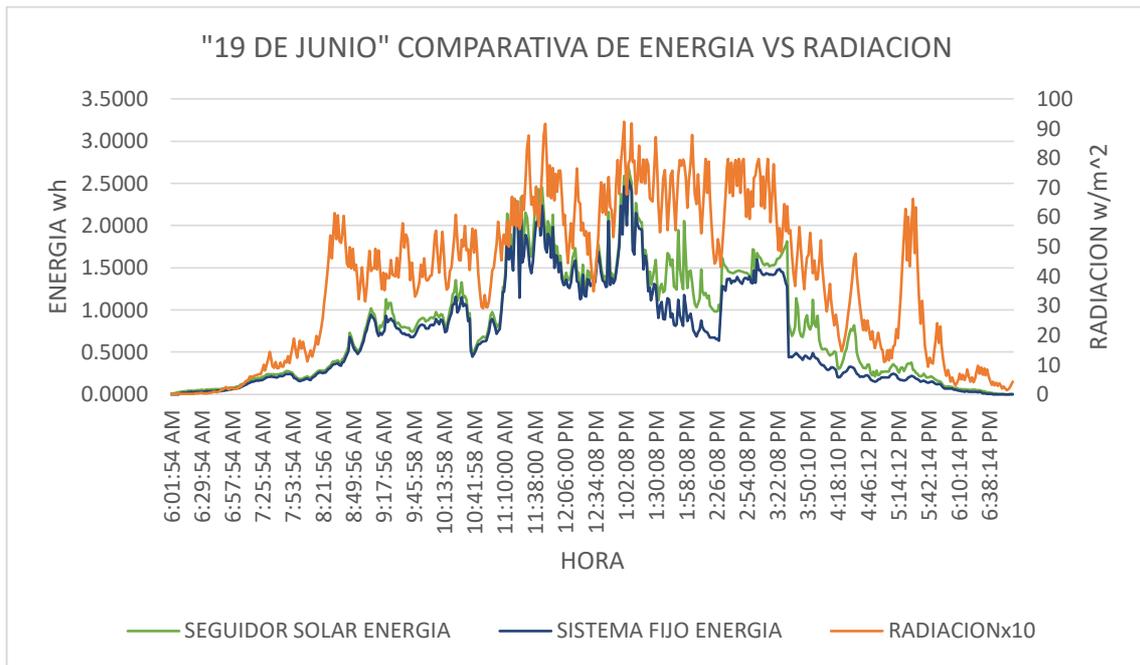
17 de junio



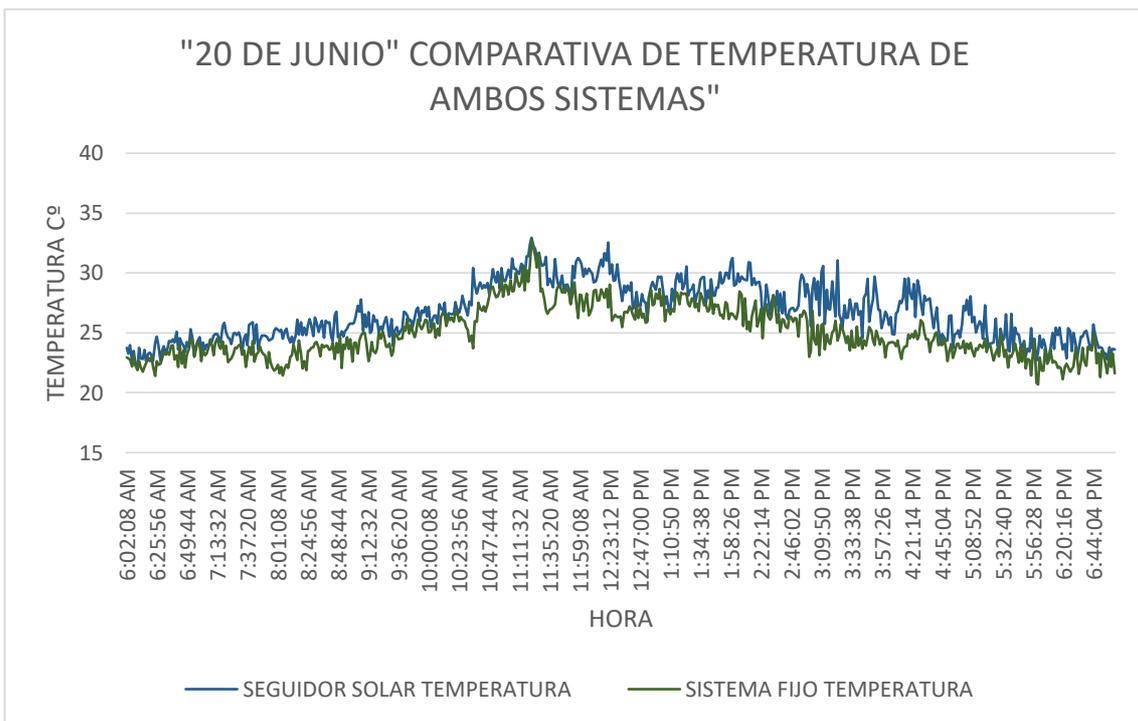
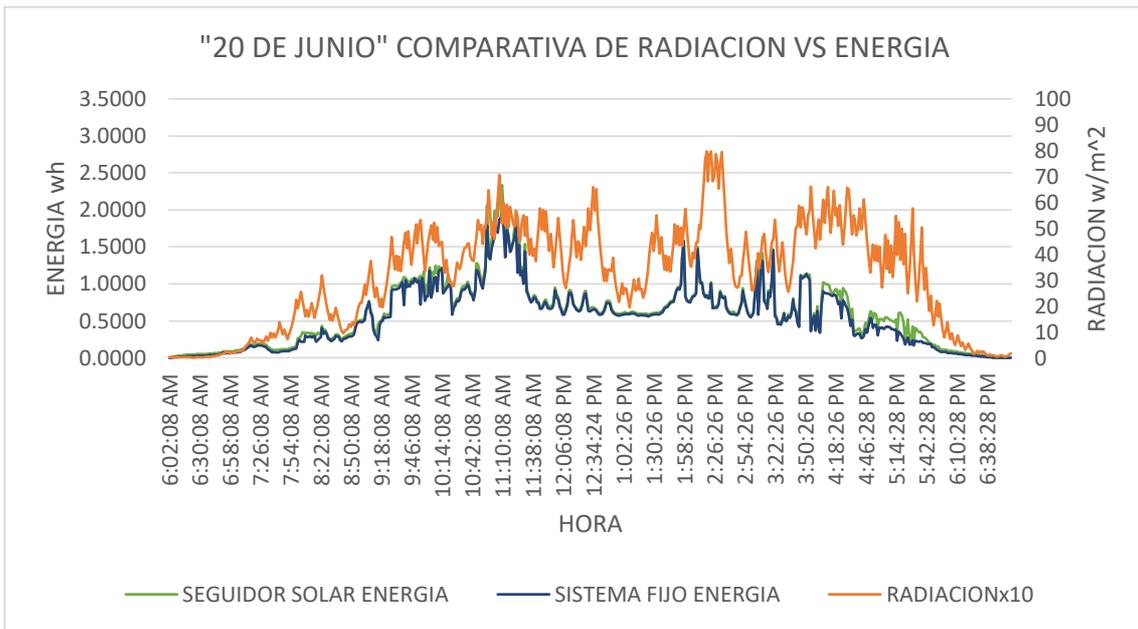
18 de junio



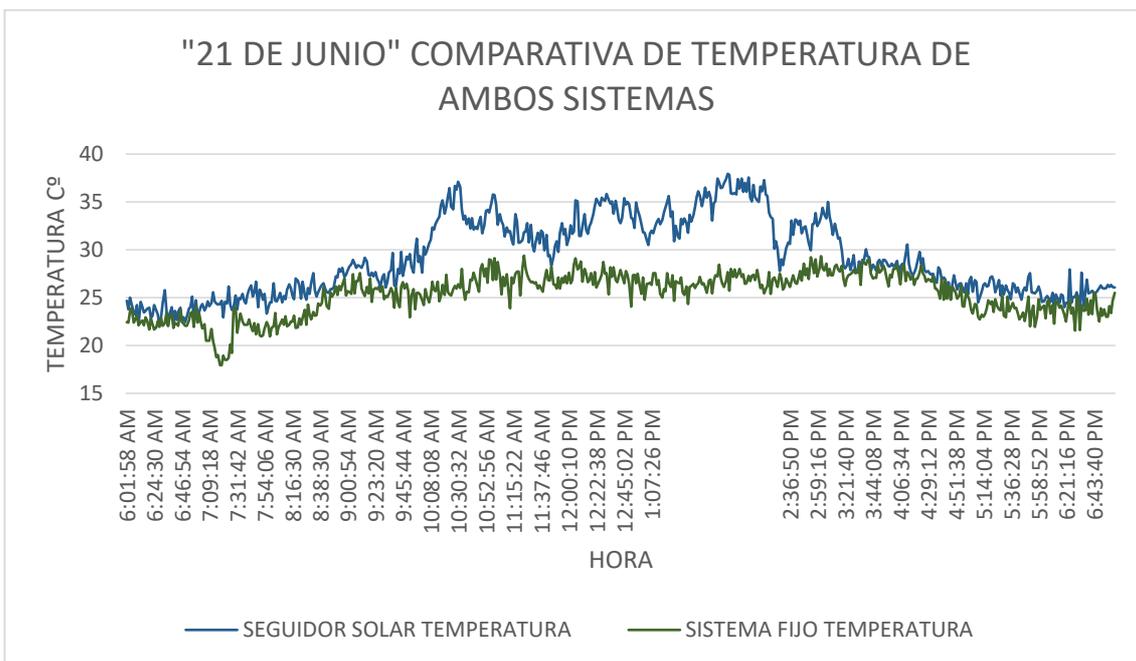
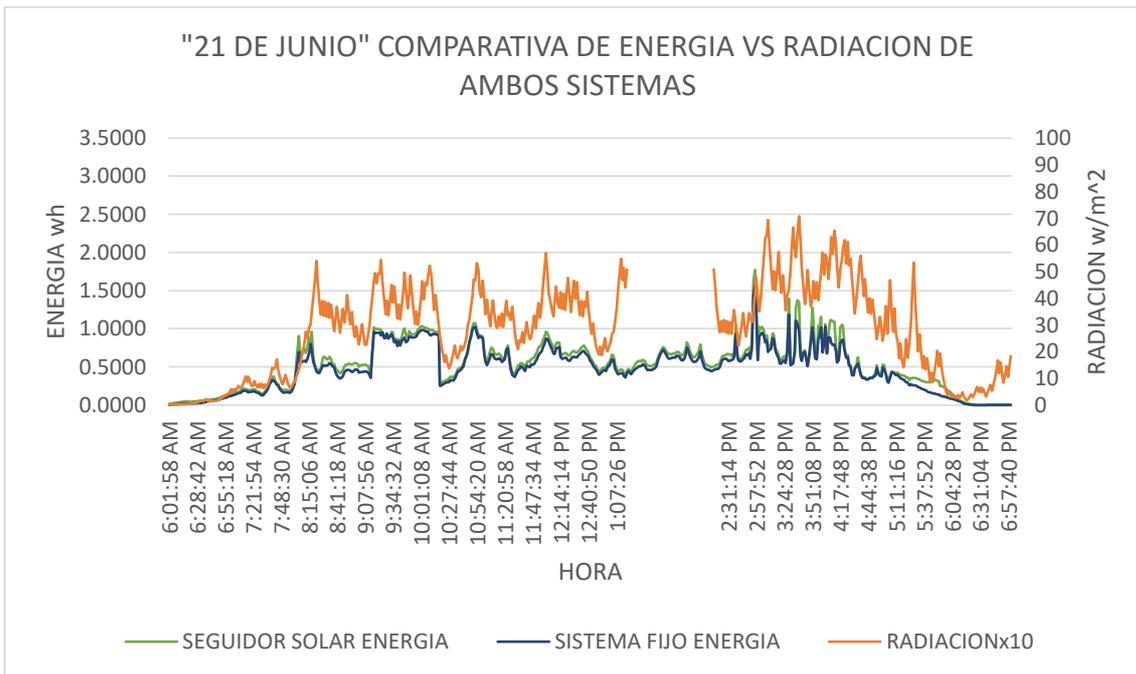
19 de Junio



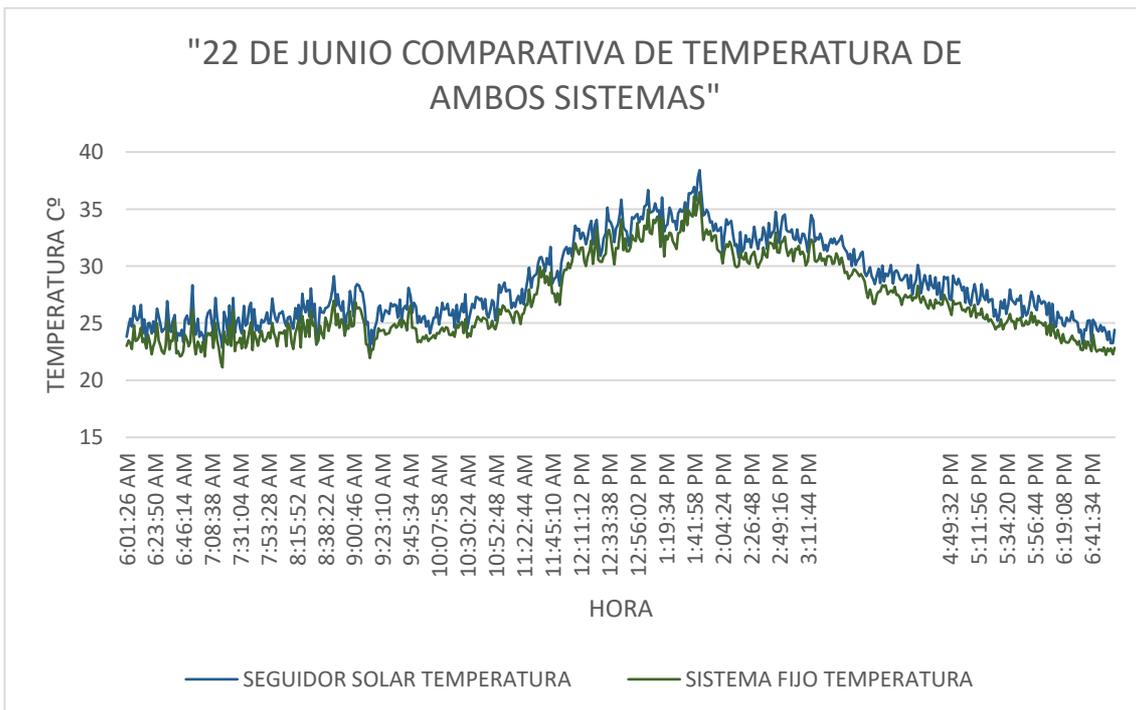
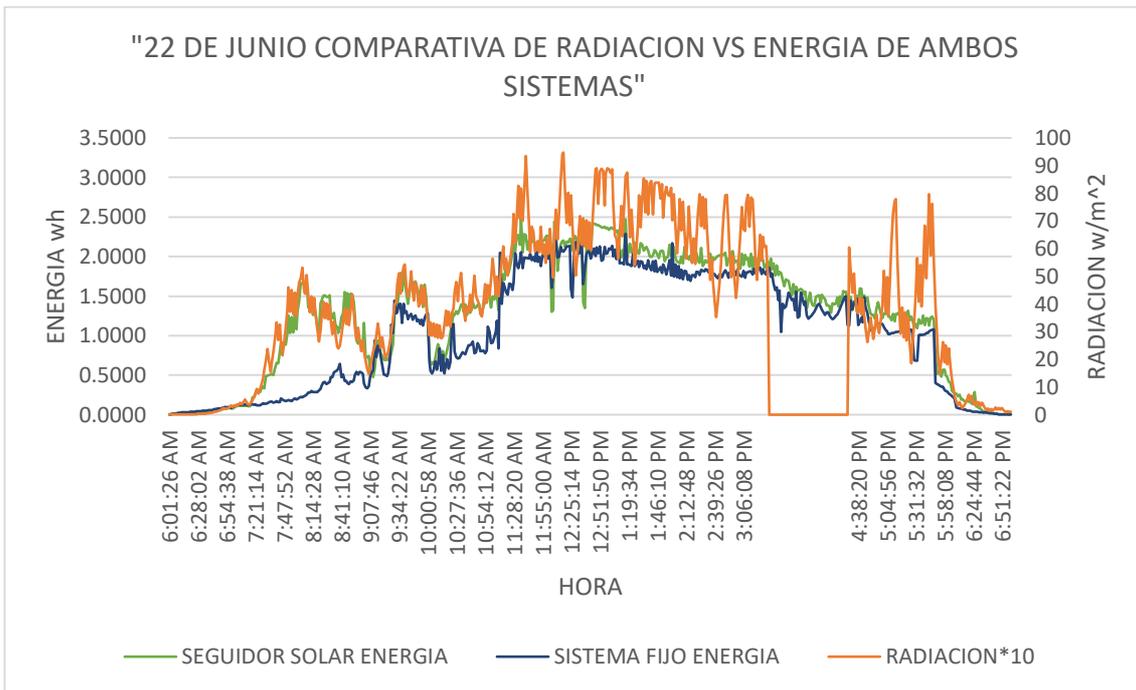
20 de Junio

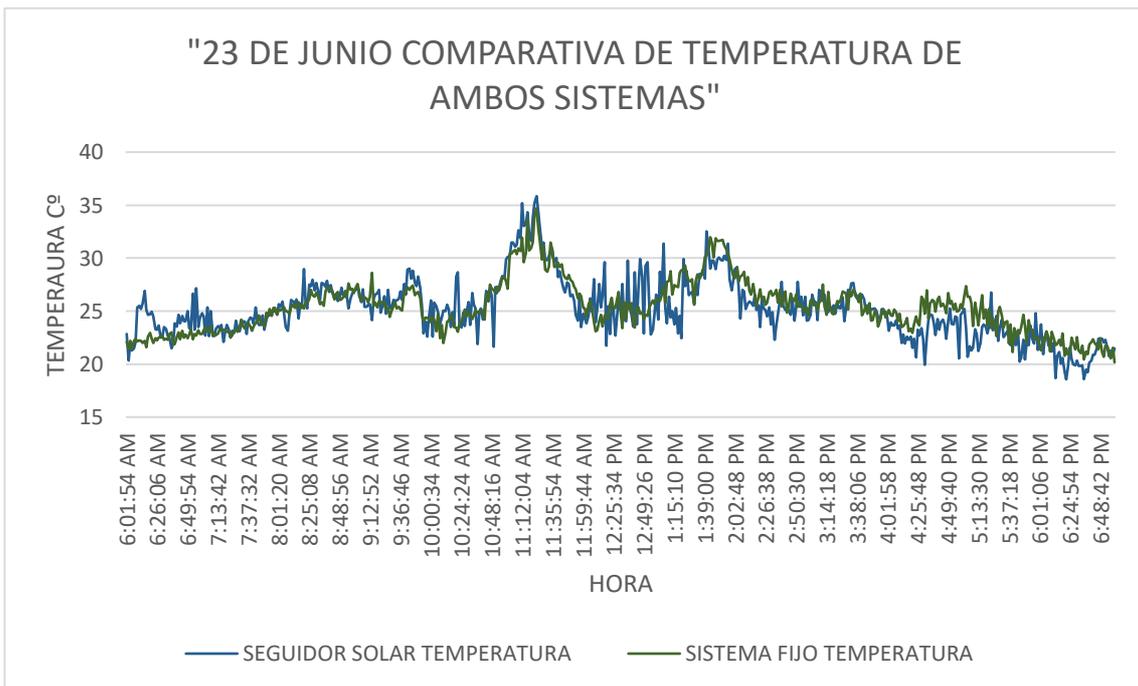
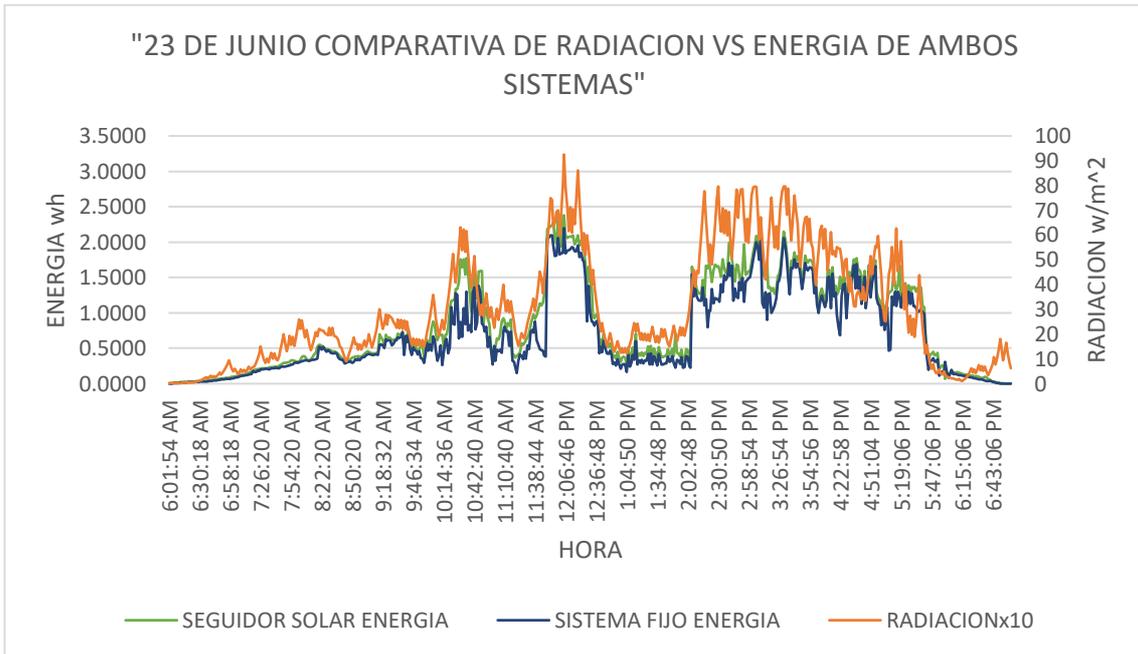


21 de Junio

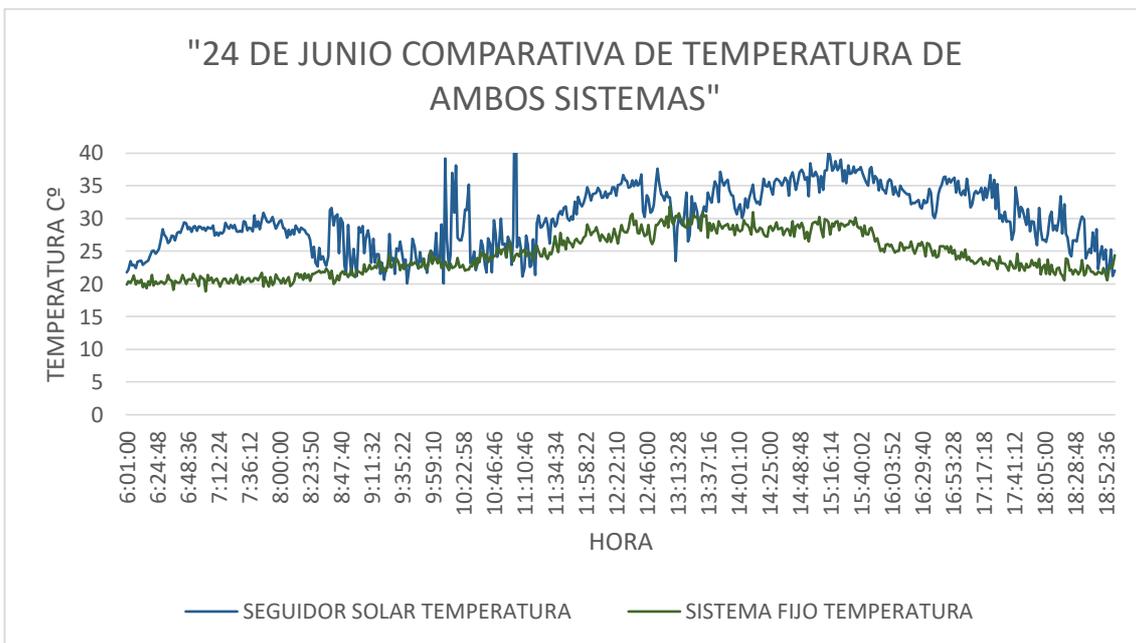
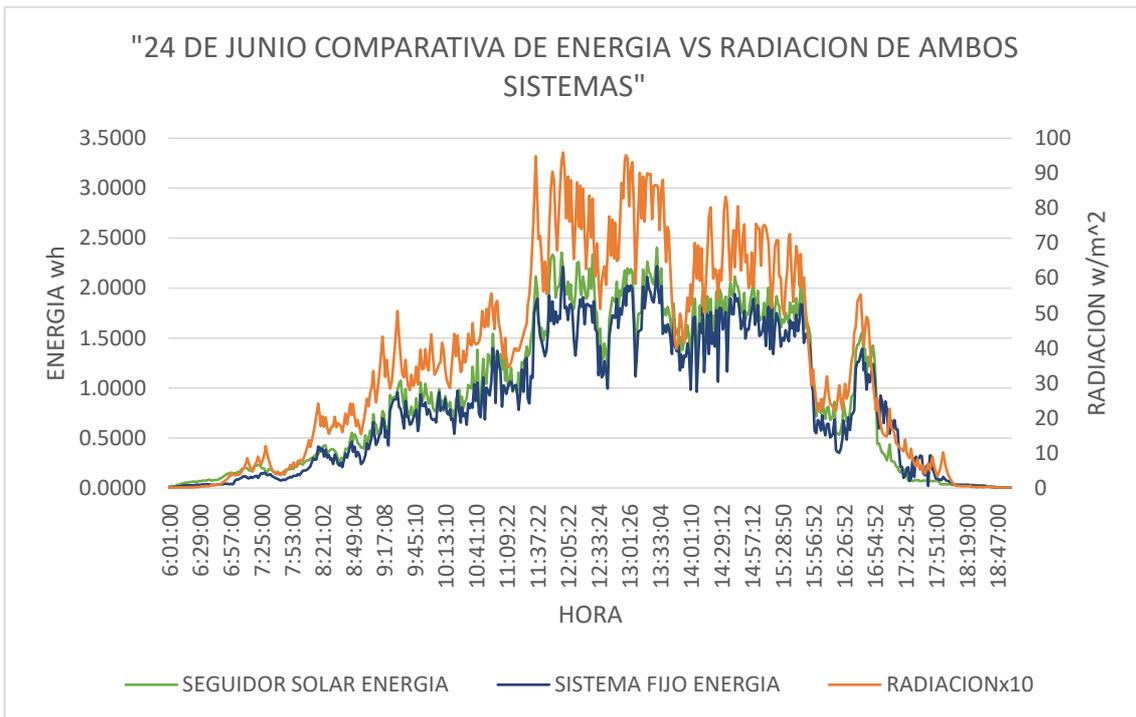


22 de Junio

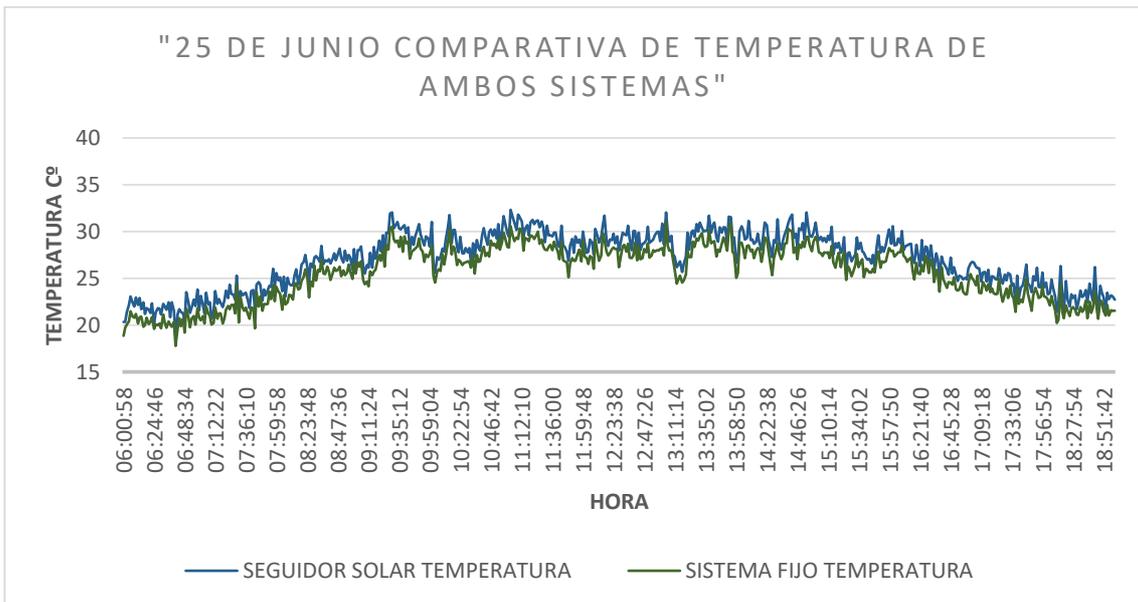
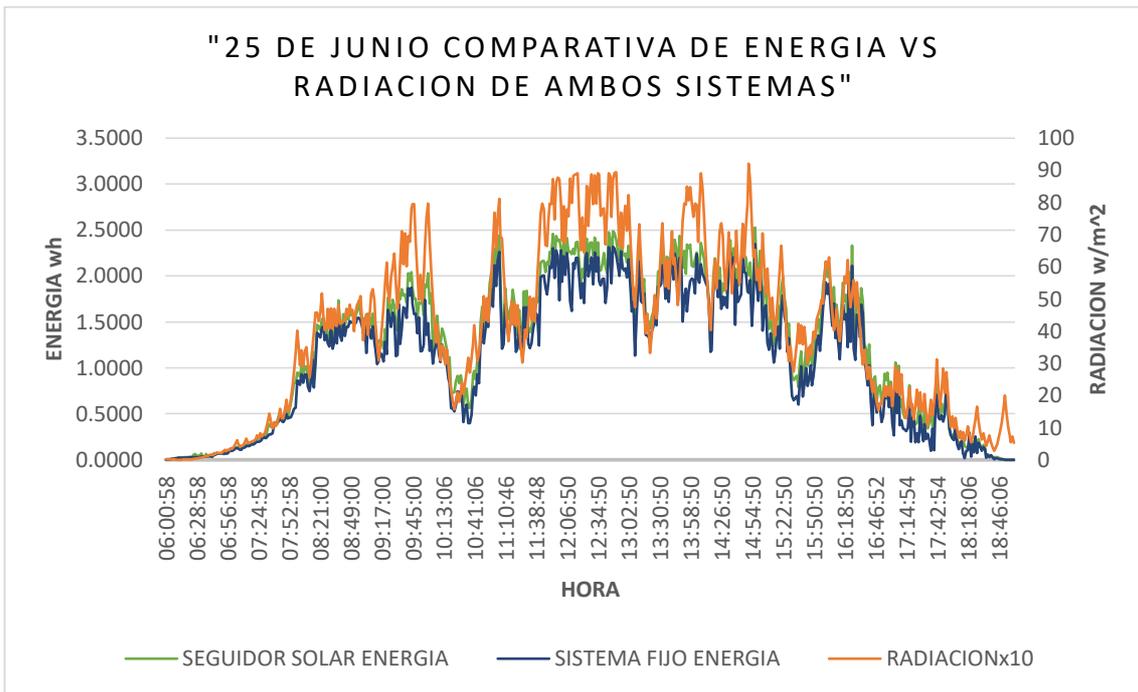




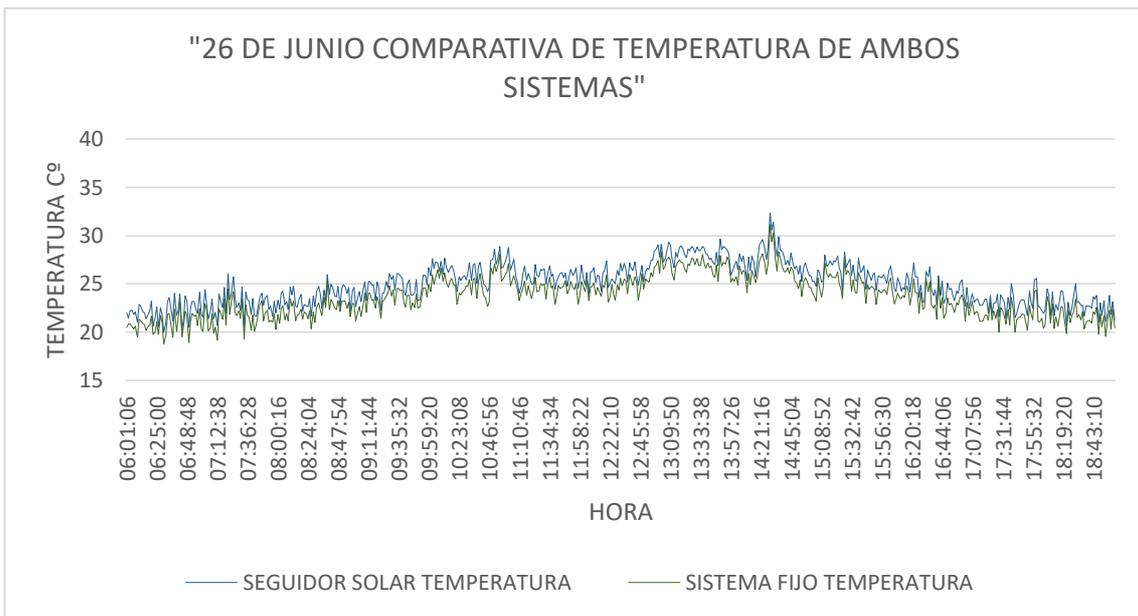
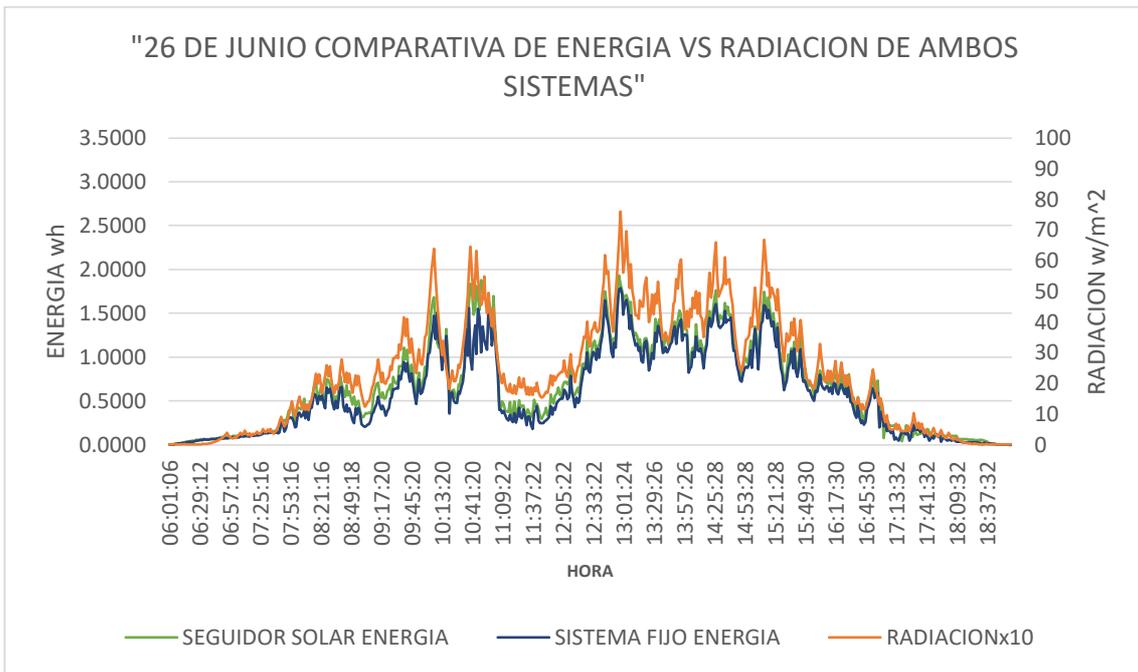
24 de Junio



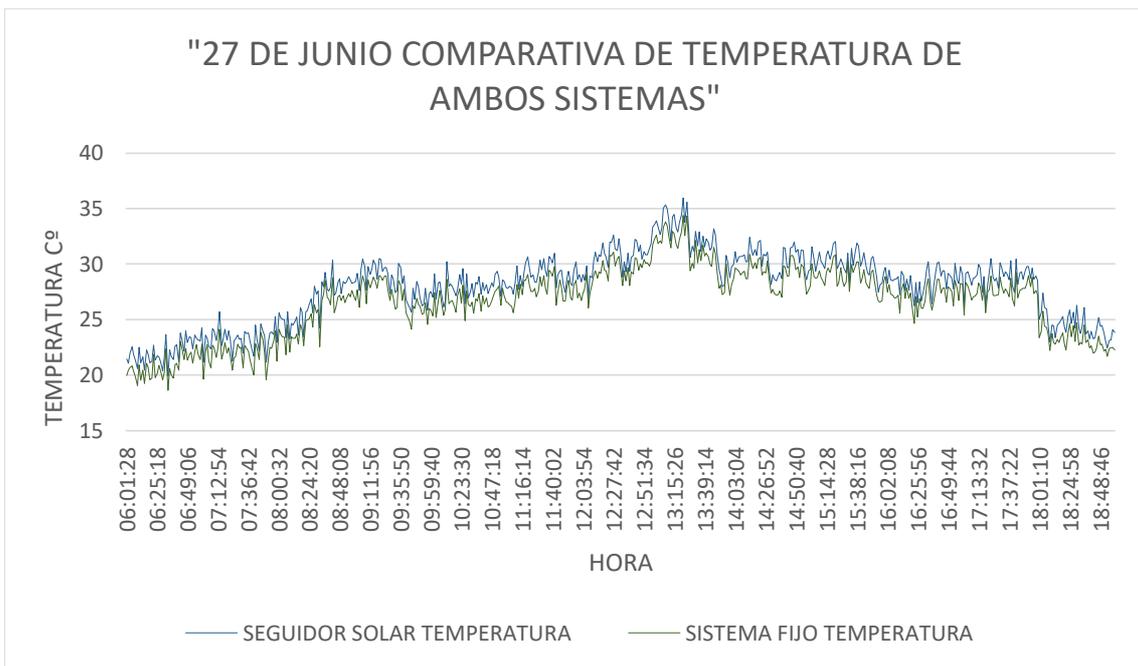
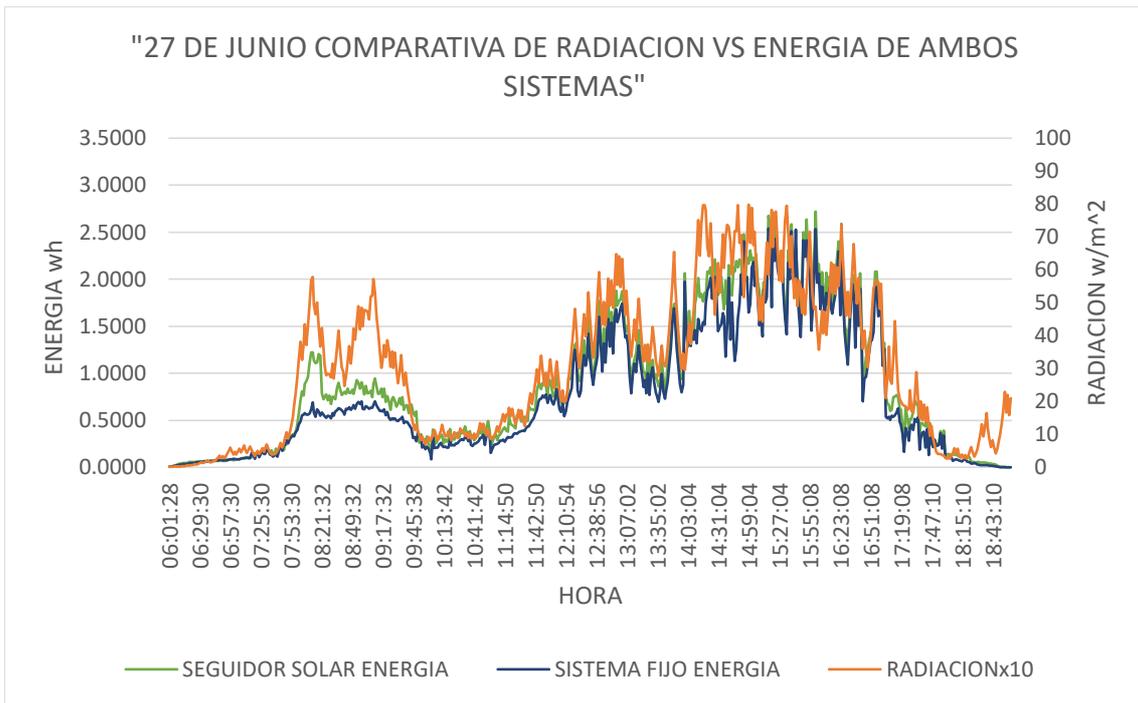
25 de Junio



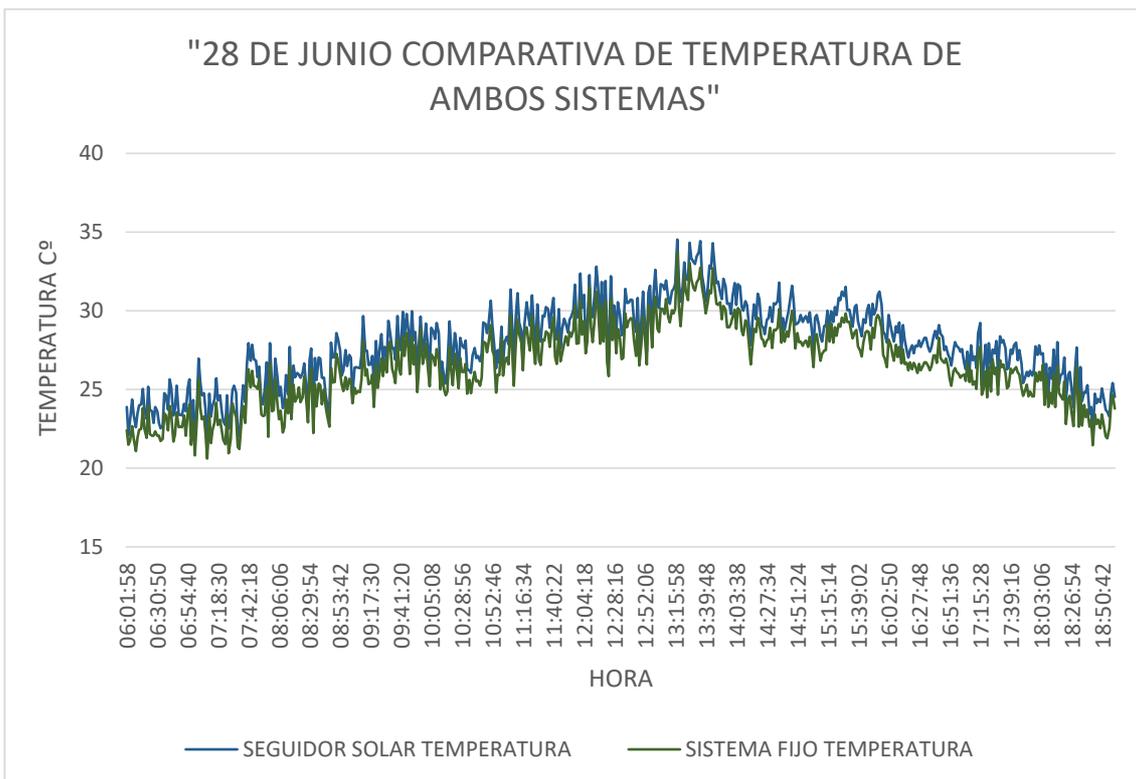
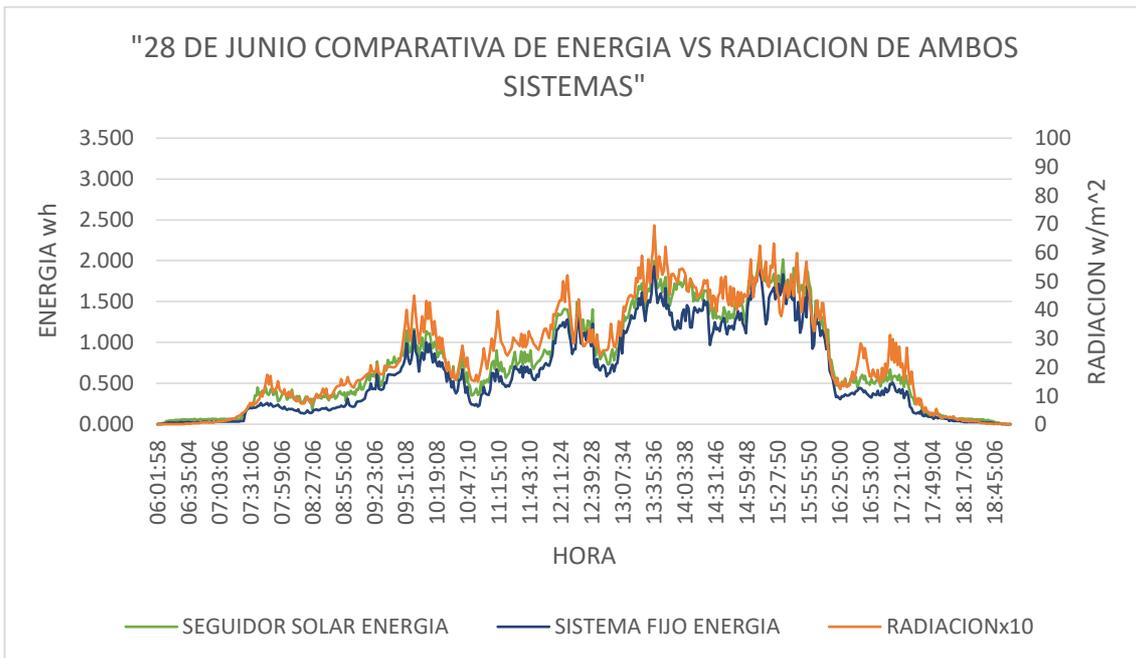
26 de Junio



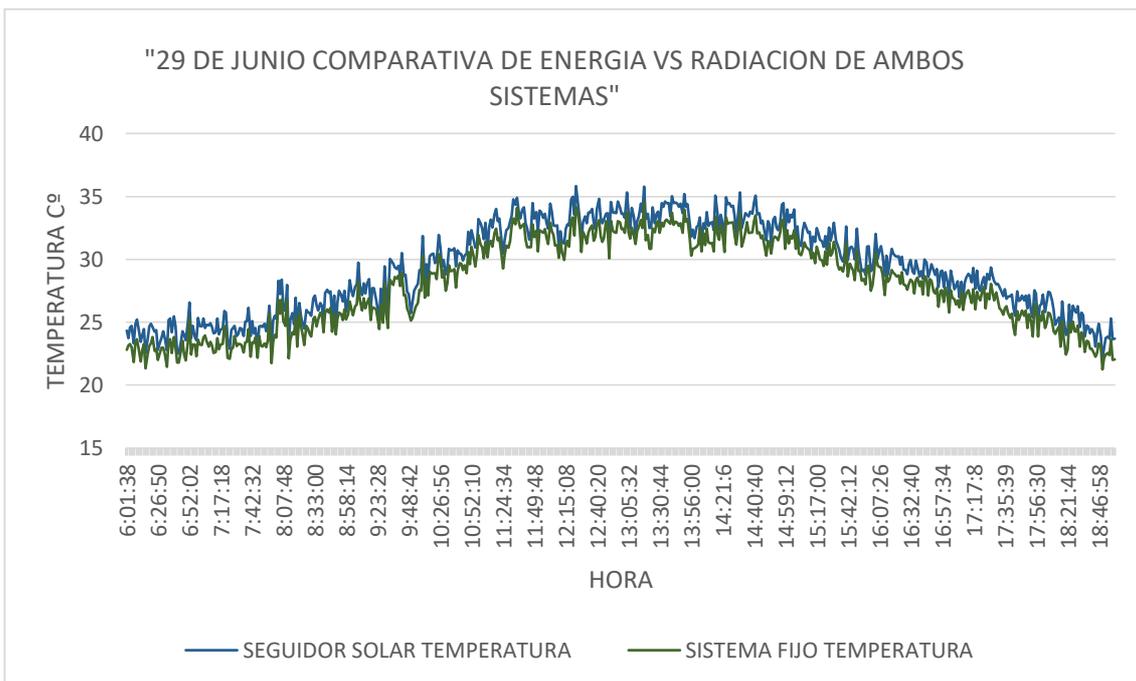
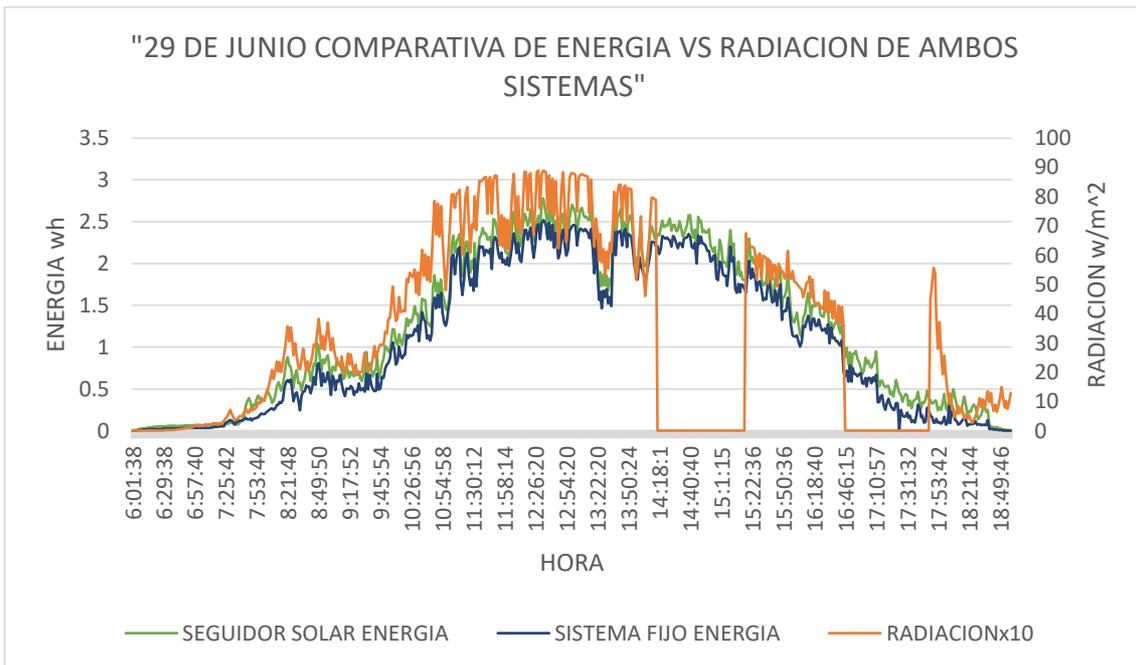
27 de Junio



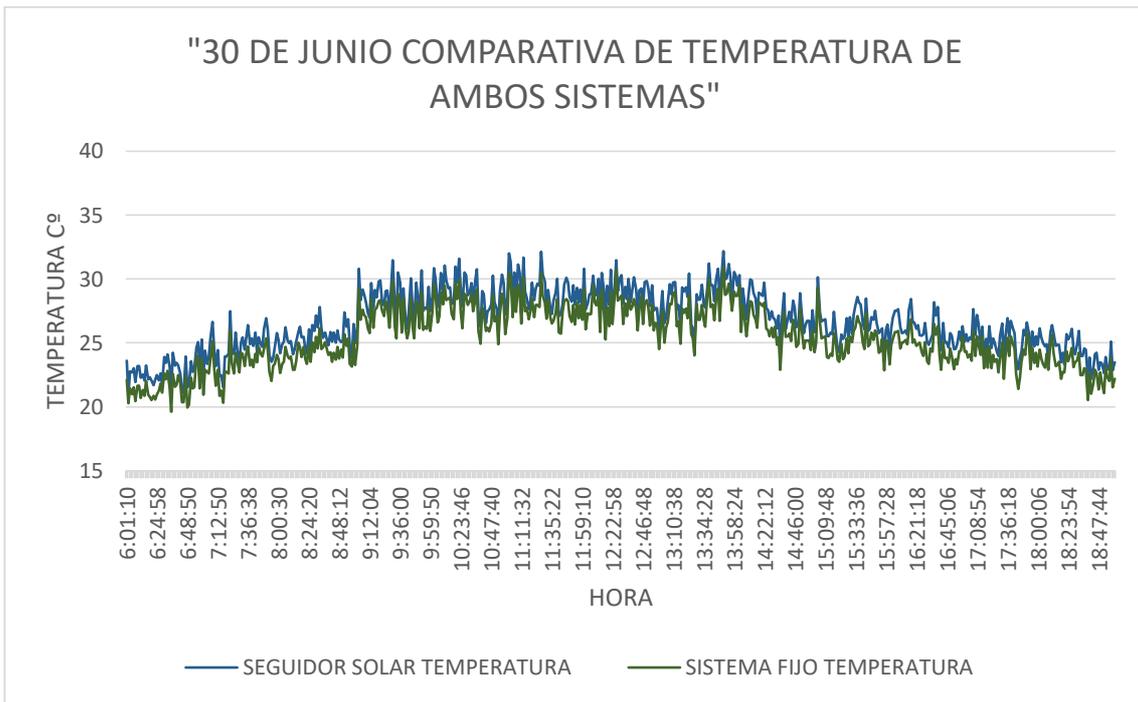
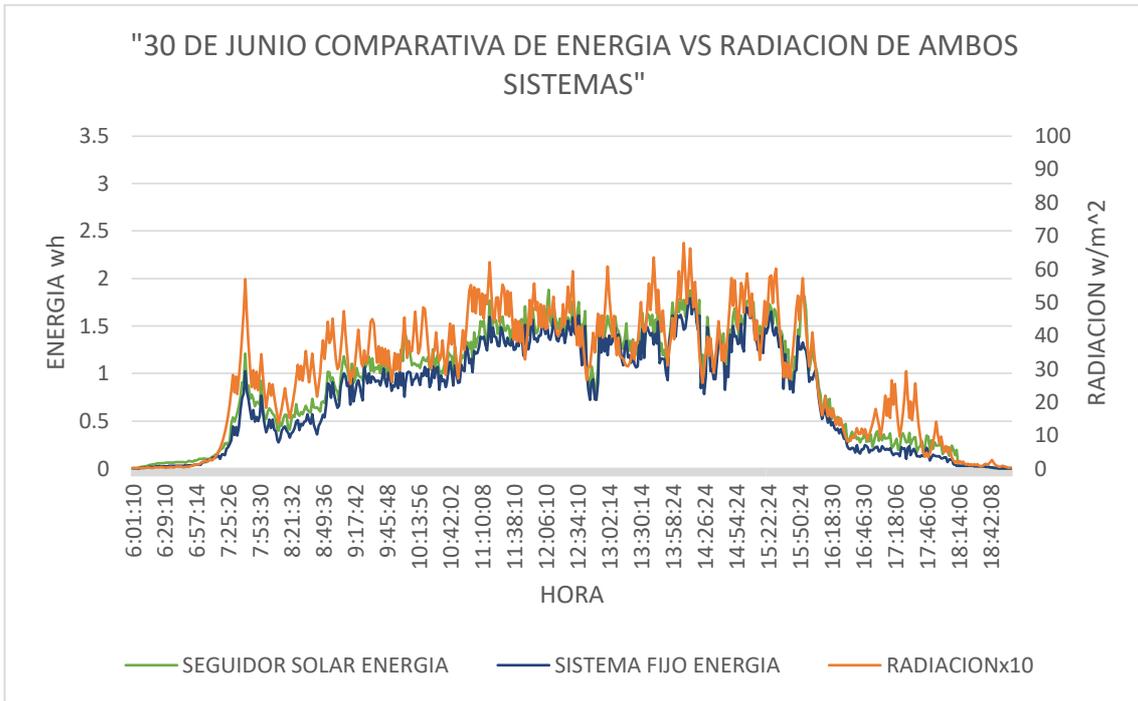
28 de Junio



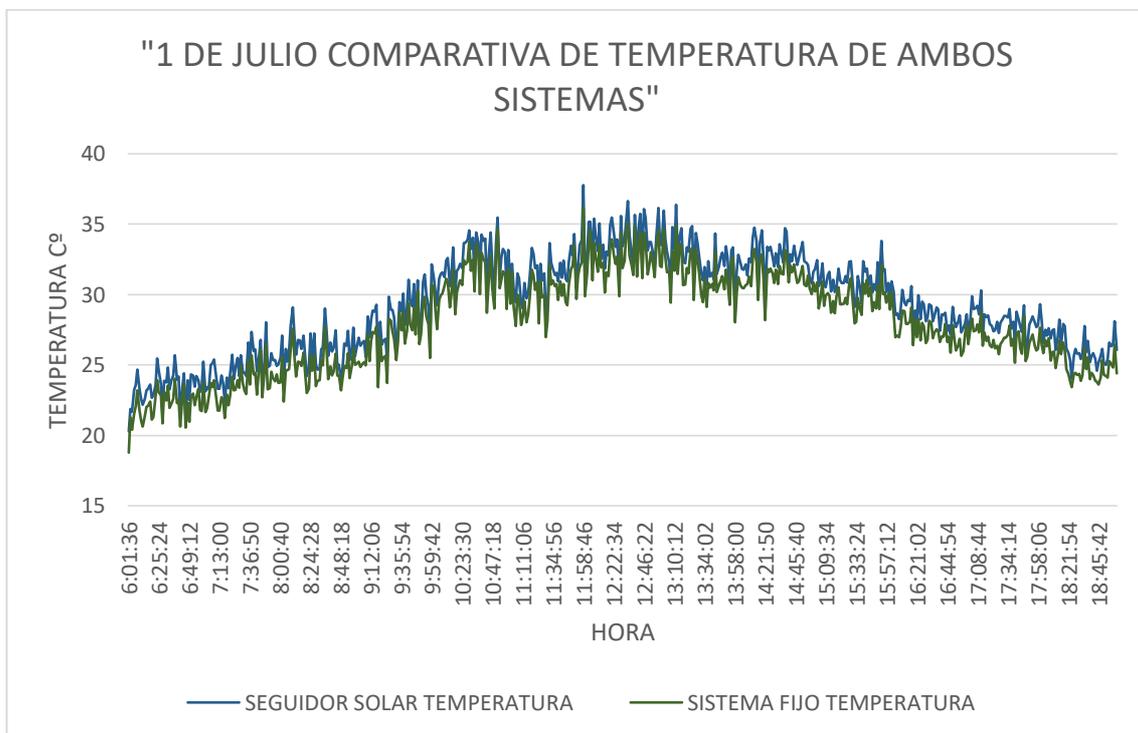
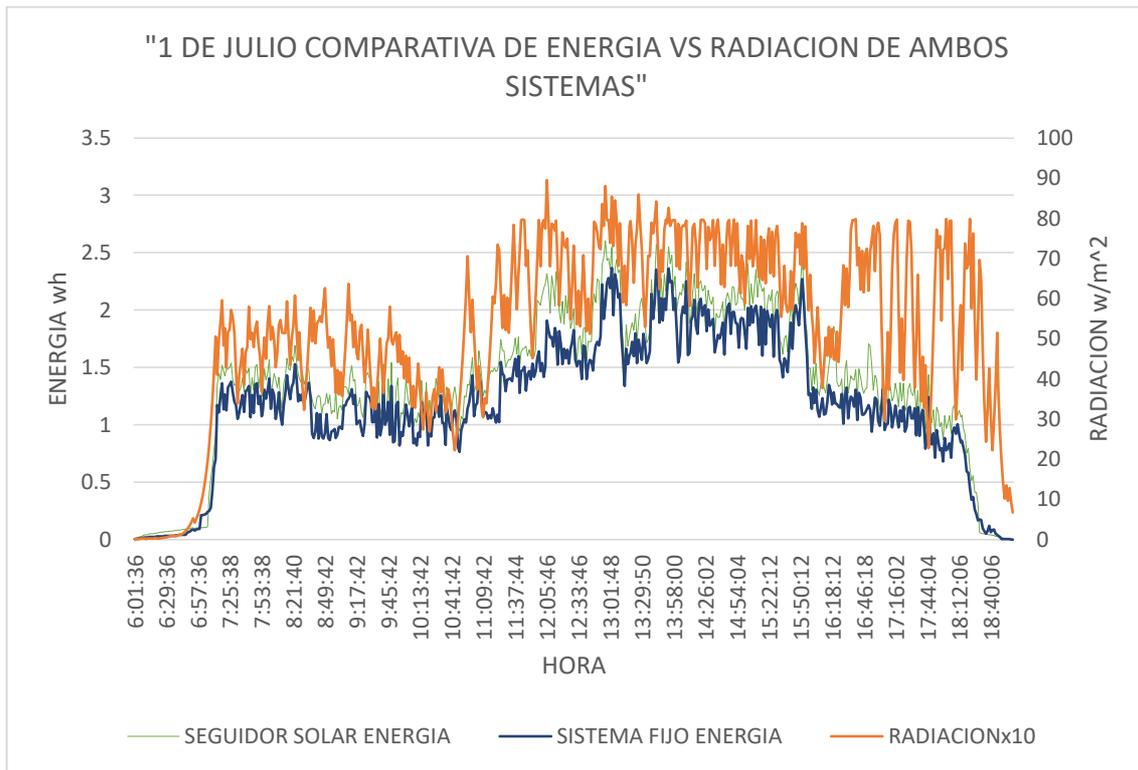
29 de Junio



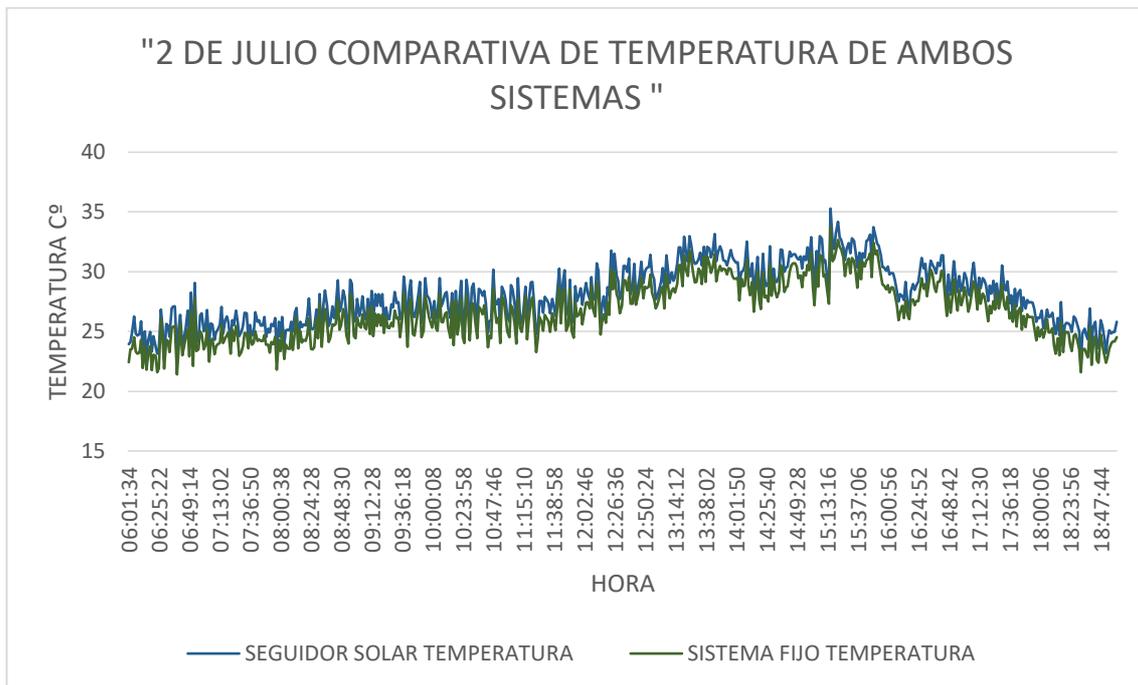
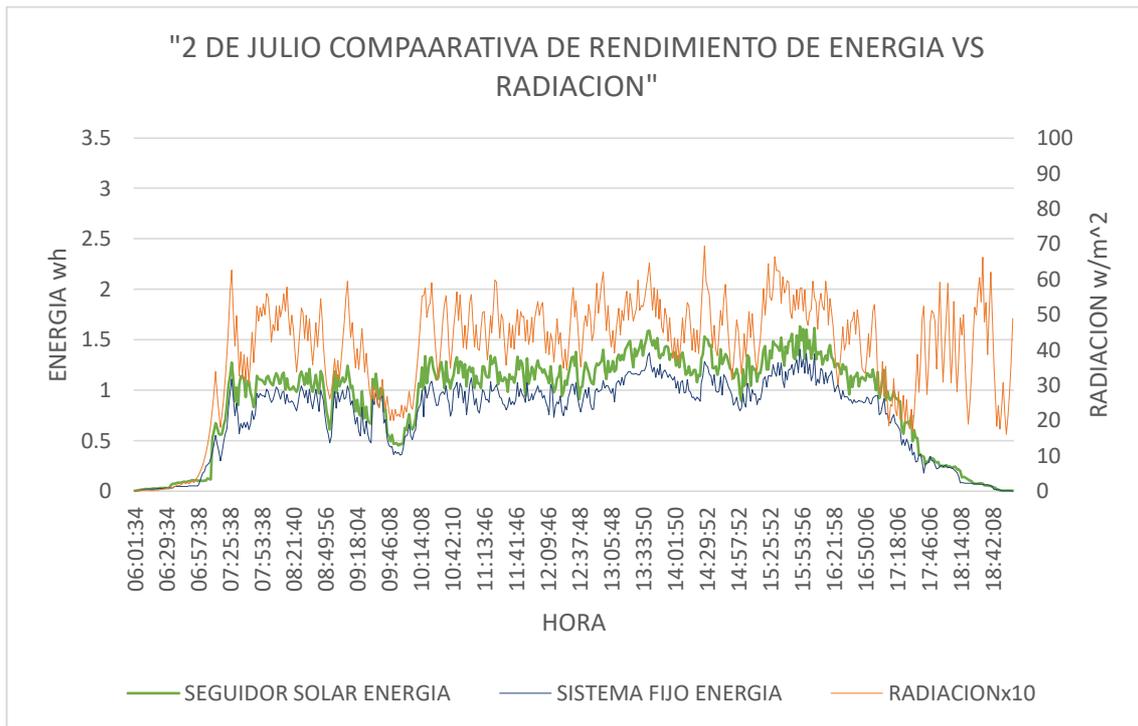
30 de Junio



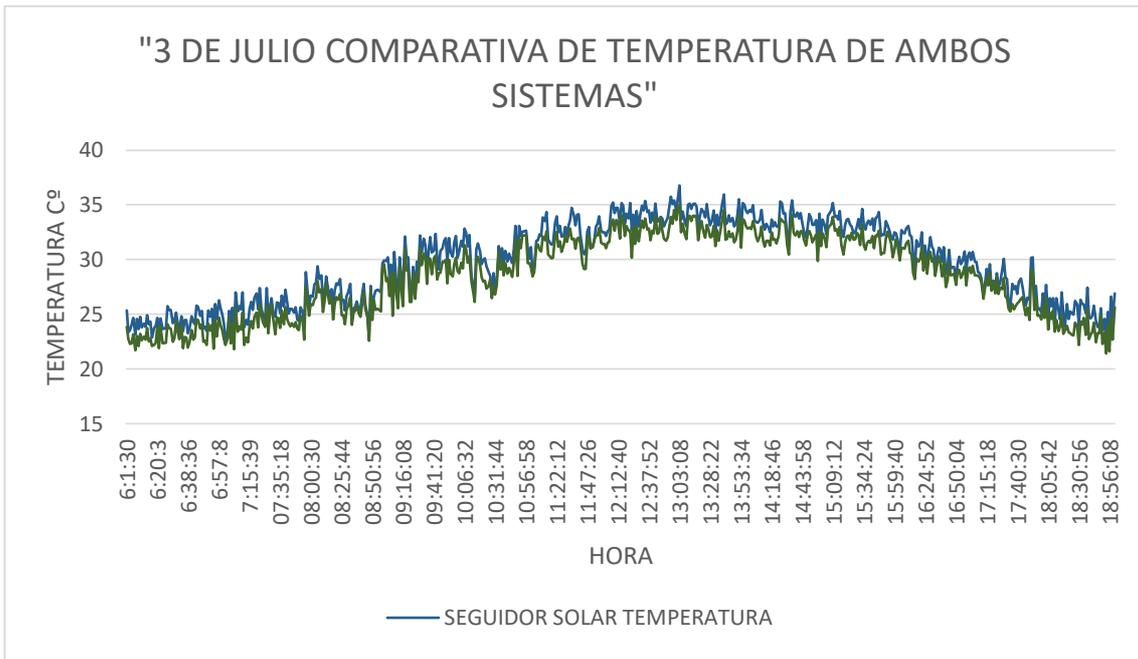
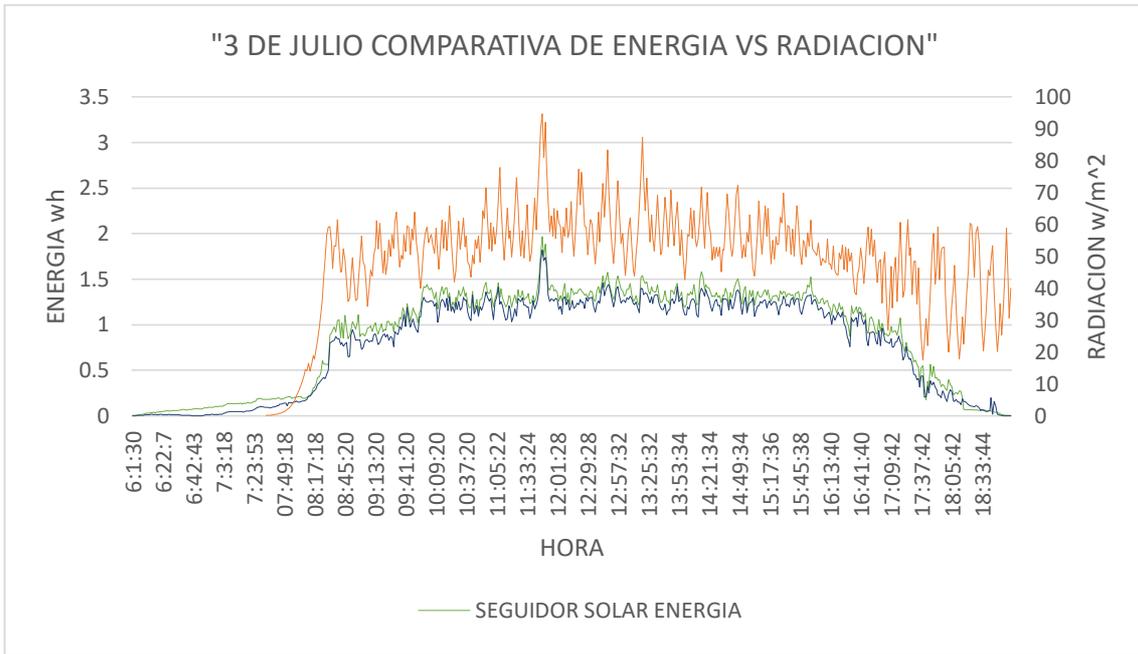
1 de Julio



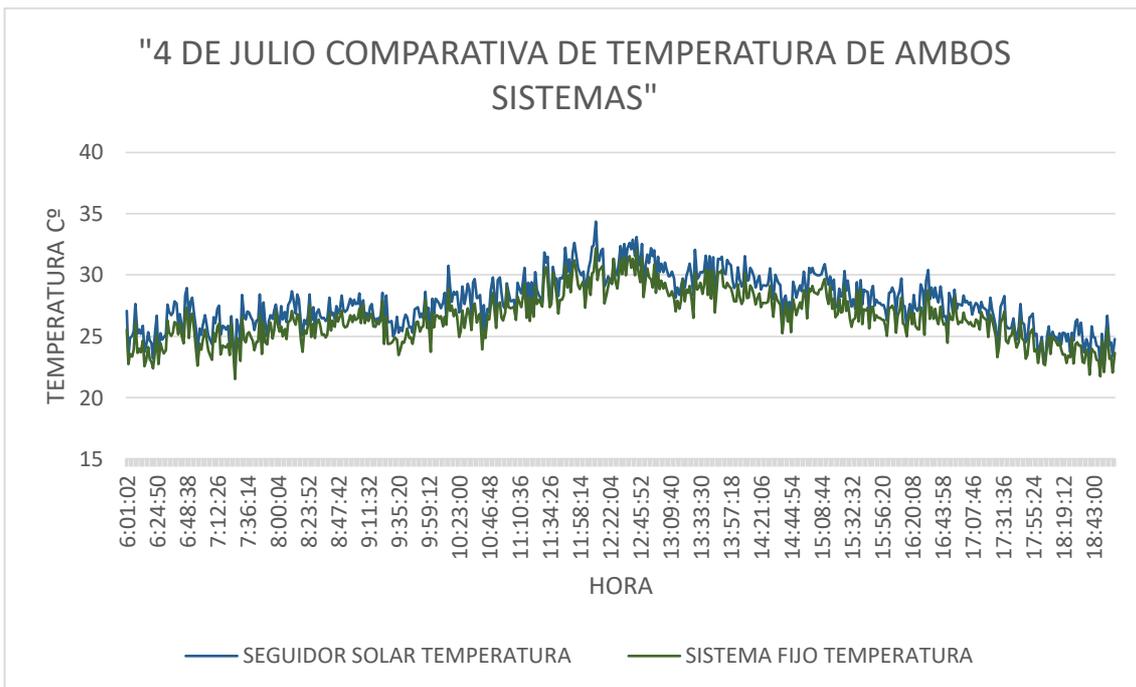
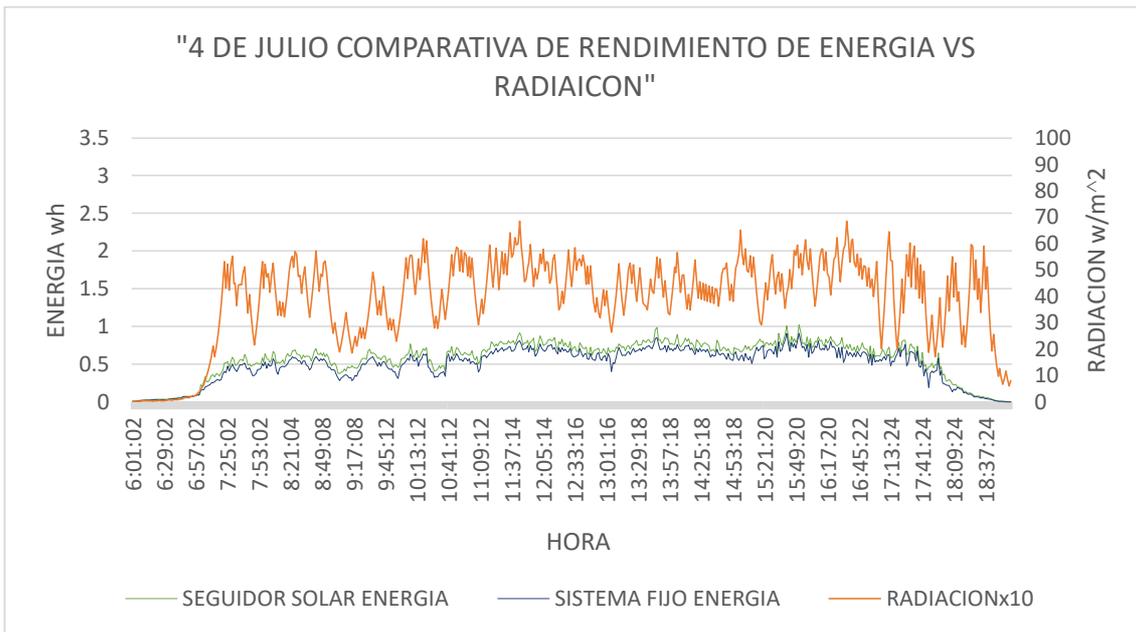
2 de Julio



3 de Julio



4 de Julio



Anexo 2. Código de programación

```
#include <Wire.h> // incluye librería para interfaz I2C
#include <RTClib.h> // incluye librería para el manejo del módulo RTC
#include <SPI.h> // incluye librería interfaz SPI
#include <SD.h> // incluye librería para tarjetas SD

#define M1PAC 23 // salidas que controlan los motores del panel seguidor
#define M1DIR 22
#define M2PAC 25
#define M2DIR 24 //motor1 es el motor horizontal y motor2 es el motor vertical

#define acs712pm A15 //sensor corriente
#define acs712pf A13 //sensor corriente
#define rele3 31
#define relef 30
#define SSpin 53 // Slave Select en pin digital 53 tarjeta SD

int lsup = 0; //valor de los sensores dependientes de la luz
int linf = 0;
int lder = 0;
int lizq = 0;
int errorv = 0; //error que existe en los valores leídos entre la posición de los sensores
int errorh = 0;
int errorva = 0;
int errorha = 0;
int promldrs = 0;
int dd; // d"x" son las detenciones para el límite de giro
int di;
int ds;
int db;
int n_muestras = 150; // número de lecturas

// Variables calculo voltaje
float Vss = 0;
float Vpf = 0;
float Voltajeseguidor;
float Voltajepfijo;

// Variables calculo corriente
float Sensibilidad = 0.100; //mv sensibilidad acs712
float vSensorIS;
float vSensorIF;
float Ipm;
float Ipf;
float Apm = 0;
float

Apf = 0;

int SENSORSS; // variable almacena valor leído de entrada analógica A4 panel móvil
float Temp1; // valor de temperatura en grados centígrados
float TempSS1;
float TempSS2;
float TemperaturaSS;
int SENSORPF; // variable almacena valor leído de entrada analógica A5 panel móvil
float Temp2; // valor de temperatura en grados centígrados
float TempPF1; // valor
```

```

float TempPF2;
float TemperaturaPF;
float tem2pxm = 0;
float PotenciaSS;
float PotenciaPF;
RTC_DS3231 rtc; // crea objeto del tipo RTC_DS3231
File archivo; // objeto archivo del tipo File

```

```

void setup () {
  pinMode (A0, INPUT);
  pinMode (A1, INPUT);
  pinMode (A2, INPUT);
  pinMode (A6, INPUT);
  pinMode (M1PAC, OUTPUT);
  pinMode (M2PAC, OUTPUT);
  pinMode (M1DIR, OUTPUT);
  pinMode (M2DIR, OUTPUT);
  pinMode (46, INPUT);
  pinMode (47, INPUT);
  pinMode (48, INPUT);
  pinMode (49, INPUT);
  pinMode(A4, INPUT);
  pinMode(A5, INPUT);
  pinMode(A12, INPUT);
  pinMode(A14, INPUT);
  pinMode(acs712pm, INPUT);
  pinMode(acs712pf, INPUT);
  pinMode(40, OUTPUT);
  pinMode(reles, OUTPUT);
  pinMode(relef, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
  rtc.begin();
  SD.begin(SSpin);
}

```

```

void loop() {
  DateTime fecha = rtc.now();
  if (fecha.hour() == 6 || fecha.hour() == 7 || fecha.hour() == 8 || fecha.hour() == 9 || fecha.hour() == 10 || fecha.hour() == 11 ||
  fecha.hour() == 12 || fecha.hour() == 13 || fecha.hour() == 14 || fecha.hour() == 15 || fecha.hour() == 16 || fecha.hour() == 17
  || fecha.hour() == 18){
    lsup = analogRead (A0);
    linf = analogRead (A1);
    lder = analogRead (A6);
    lizq = analogRead (A2);

    errorv = (lsup - linf);
    errorva = abs (errorv);
    errorh = (lder - lizq);
    errorha = abs (errorh);
    promldrs = ((lsup + linf + lder + lizq) / 4);

    dd = digitalRead(46);
    di = digitalRead(47);
    ds = digitalRead(48);
    db = digitalRead(49);

    if (promldrs > 985) {
      if (errorha > 8) {

```

```

if (errorh > 0) {
  if (di == LOW) {
    digitalWrite(M1DIR, HIGH);
    delay(10);
    digitalWrite(M1PAC, HIGH);
    delay(10);
    digitalWrite(M1PAC, LOW);
    delay(10);
  }
}
else if (errorh < 0) {
  if (dd == LOW) {
    digitalWrite(M1DIR, LOW);
    delay(10);
    digitalWrite(M1PAC, HIGH);
    delay(10);
    digitalWrite(M1PAC, LOW);
    delay(10);
  }
}
}
if (errorva > 5) {
  if (errorv > 0) {
    if (ds == LOW) {
      digitalWrite(M2DIR, HIGH);
      delay(10);
      digitalWrite(M2PAC, HIGH);
      delay(10);
      digitalWrite(M2PAC, LOW);
      delay(10);
    }
  }
}
else if (errorv < 0) {
  if (db == LOW) {
    digitalWrite(M2DIR, LOW);
    delay(10);
    digitalWrite(M2PAC, HIGH);
    delay(10);
    digitalWrite(M2PAC, LOW);
    delay(10);
  }
}
}
}
else if (promldrs < 984) {
  if (errorha > 30) {
    if (errorh > 0) {
      if (di == LOW) {
        digitalWrite(M1DIR, HIGH);
        delay(10);
        digitalWrite(M1PAC, HIGH);
        delay(10);
        digitalWrite(M1PAC, LOW);
        delay(10);
      }
    }
  }
  else if (errorh < 0) {
    if (dd == LOW) {
      digitalWrite(M1DIR, LOW);
      delay(10);
      digitalWrite(M1PAC, HIGH);
    }
  }
}
}

```

```

    delay(10);
    digitalWrite(M1PAC, LOW);
    delay(10);
  }
}
}
if (errorva > 15) {
  if (errorv > 0) {
    if (ds == LOW) {
      digitalWrite(M2DIR, HIGH);
      delay(10);
      digitalWrite(M2PAC, HIGH);
      delay(10);
      digitalWrite(M2PAC, LOW);
      delay(10);
    }
  }
  else if (errorv < 0) {
    if (db == LOW) {
      digitalWrite(M2DIR, LOW);
      delay(10);
      digitalWrite(M2PAC, HIGH);
      delay(10);
      digitalWrite(M2PAC, LOW);
      delay(10);
    }
  }
}
}
}
}

```

// lectura corrientes de cortocircuito ambos paneles.....

```

digitalWrite(reles, HIGH);
digitalWrite(relef, HIGH);
Apm = 0;
Apf = 0;
TempSS1 = 0;
TempPF1 = 0;
for (int i = 0; i < n_muestras; i++)
{
  vSensorIS = analogRead(acs712pm) * (5 / 1023.0); ///lectura del sensor seguidor solar
  Apm = Apm + (vSensorIS - 2.5) / Sensibilidad; //Ecuación para obtener la corriente
  vSensorIF = analogRead(acs712pf) * (5 / 1023.0); ///lectura del sensor panel fijo
  Apf = Apf + (vSensorIF - 2.5) / Sensibilidad; //Ecuación para obtener la corriente
  SENSORSS = analogRead(A4); // lectura de entrada analógica A4 sensor temperatura Seguidor Solar
  Temp1 = ((SENSORSS * 5000.0) / 1023) / 10; //lectura temperatura
  TempSS1 = TempSS1 + Temp1;
  SENSORPF = analogRead(A5); // lectura de entrada analogica A4 sensor temperatura Seguidor Solar
  Temp2 = ((SENSORPF * 5000.0) / 1023) / 10; //ec temperatura
  TempPF1 = TempPF1 + Temp2;
  delay(100);
}

Apm = Apm / n_muestras;
Apm = abs (Apm);
Ipm = Apm;
Apf = Apf / n_muestras;
Apf = abs (Apf);
Ipf = Apf;
TempSS1 = TempSS1 / n_muestras;
TempPF1 = TempPF1 / n_muestras;

```

```

//.....lectura voltaje circuito abierto

digitalWrite(reles, LOW);
digitalWrite(relef, LOW);
Vss = 0;
Vpf = 0;
TempSS2 = 0;
TempPF2 = 0;
for (int i = 0; i < n_muestras; i++)
{
  vSensorIS = (float)25 * analogRead(A14) / 1023; //lectura sensor de voltaje seguidor solar
  Vss = Vss + vSensorIS;
  vSensorIF = (float)25 * analogRead(A11) / 1023; //lectura sensor de voltaje seguidor solar
  Vpf = Vpf + vSensorIF;
  SENSORSS = analogRead(A4); // lectura de entrada analogica A4 sensor temperatura Seguidor Solar
  Temp1 = ((SENSORSS * 5000.0) / 1023) / 10; //ec temperatura
  TempSS2 = TempSS2 + Temp1;
  SENSORPF = analogRead(A5); // lectura de entrada analogica A4 sensor temperatura Seguidor Solar
  Temp2 = ((SENSORPF * 5000.0) / 1023) / 10; //ec temperatura
  TempPF2 = TempPF2 + Temp2;
  delay(100);
}

Vss = Vss / n_muestras;
Voltajeseguidor = Vss;
Vpf = Vpf / n_muestras;
Voltajefijo = Vpf;
TempSS2 = TempSS2 / n_muestras;
TempPF2 = TempPF2 / n_muestras;

//calculo potencia y temperatura del minuto

PotenciaSS = Voltajeseguidor * Ipm;
PotenciaPF = Voltajefijo * Ipf;
TemperaturaSS = (TempSS1 + TempSS2) / 2;
TemperaturaPF = (TempPF1 + TempPF2) / 2;

//guardado de datos en tarjeta SD

archivo = SD.open("datos.txt", FILE_WRITE); // apertura para lectura/escritura de archivo datos.txt
archivo.println(String(fecha.day()) + "/" + String(fecha.month()) + " " + String(fecha.hour()) + ":" + String(fecha.minute())
+ ":" + String(fecha.second()) + "," + String(Voltajeseguidor) + "," + String(Ipm) + "," + String(PotenciaSS) + "," +
String(TemperaturaSS) + "," + String(Voltajefijo) + "," + String(Ipf) + "," + String(PotenciaPF) + "," +
String(TemperaturaPF));
  delay(10);
  archivo.close();
  delay(20);
}

if ( fecha.hour() == 19) {
  digitalWrite(reles, LOW);
  digitalWrite(relef, LOW);
  di = digitalRead(47);
  db = digitalRead(49);
  if (di == LOW) {
    digitalWrite(M1DIR, HIGH);
    delay(10);
    digitalWrite(M1PAC, HIGH);
    delay(10);
    digitalWrite(M1PAC, LOW);
  }
}

```

```

    delay(10);
}

if (db == LOW) {
    digitalWrite(M2DIR, LOW);
    delay(10);
    digitalWrite(M2PAC, HIGH);
    delay(10);
    digitalWrite(M2PAC, LOW);
    delay(10);
}
delay(60000);
}

if (fecha.hour() == 20 || fecha.hour() == 21 || fecha.hour() == 22 || fecha.hour() == 23 || fecha.hour() == 0 || fecha.hour() == 1
|| fecha.hour() == 2 || fecha.hour() == 3 || fecha.hour() == 4 || fecha.hour() == 5) {

digitalWrite(reles, LOW);
digitalWrite(relef, LOW);

di = digitalRead(47);
    if (di == LOW) {
        digitalWrite(M1DIR, HIGH);
        delay(10);
        digitalWrite(M1PAC, HIGH);
        delay(10);
        digitalWrite(M1PAC, LOW);
        delay(10);
    }
    delay(60000);
}
}

```

Anexo 3. Presupuesto Sistema solar de 3KW



Greensun Solar Energy Tech Co., Limited

No.2000 Changjiang West Road Shushan District Hefei China

To:
Name:
Tel:
E-mail:
Company Name:

Contact Person: Walker Liu
Whatsapp&Wechat: 0086 182 9796 6929
E-mail: greensun12@greensunpv.co
Skype: 0086 182 9796 6929
Company Web: www.greensunpv.com
Quote Date: 2021/7/12

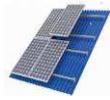


QUOTATION of 3KW Off Grid Solar System (GS3000-OFF)

Item	Model	Picture	Description	Qty(PCS)	Unit Price	Amount
1	GSM410 410w mono solar panel		Size: 1978*885*35mm	6	US\$99.00	US\$594.00
2	DC Breaker		customized	2	US\$85.00	US\$170.00
3	Off grid Inverter		3kw off grid solar inverter LCD display Split phase	1	US\$570.00	US\$570.00
5	GEL Battery		12V 200AH, Free Maintenance, Deep Cycle	2	US\$155.00	US\$310.00
6	PV Cable		PV 4mm2	100m	US\$0.90	US\$90.00
7	MC4 Connector		Rated current: 30A Rated voltage: 1000VDC	6	US\$1.00	US\$6.00

8

**Mounting
Brackets**



Customized for roof

1set

US\$270.60

US\$270.60

1SET 3KW EXW PRICE

US\$2,010.60

Payment term: 100% TT in advance

Delivery time: 12working days after receiving payment

Quote Validity: 15 days

Package: Wood Pallet with good protection

Anexo 4. Tabla precios materiales seguidor solar

circuito impreso	\$15
sensores ldr	\$3.6
resistencias	\$3
baquelitas	\$3
motor paso a paso	\$200
controlador	\$60
Arduino mega	\$15
ruliman cónico	\$45
pernos y tuercas	\$10
bocines	\$25
estructura seguidores	\$100
cable conexiones	\$10
cadenas	\$4.5
piñones	\$15
finales de carrera	\$30
total	539.1

(Los Autores, 2021)

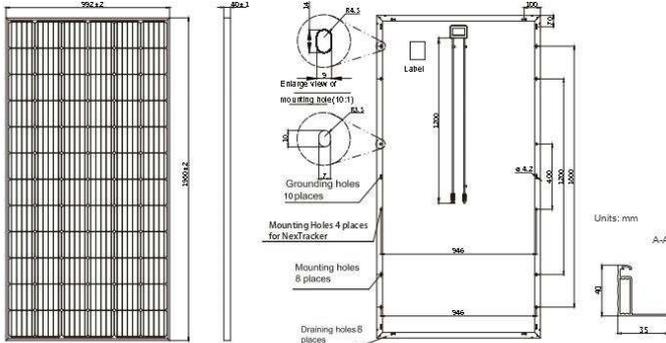
Anexo 5. Ficha técnica Panel solar de 410W

GSM410/PR

baurat.online
Eine Unternehmung der Design und mehr GmbH

SPECIFICATIONS

Cell	Mono
Weight	22.3kg±3%
Dimensions	1960±2mm×992±2mm×40±1mm
Cable Cross Section Size	4mm ²
No. of cells	72(6x12)
Junction Box	IP67, 3 diodes
Connector	MC4
Packaging Configuration	27 Per Pallet



Remark: customized frame color and cable length available upon request.

ELECTRICAL PARAMETERS AT STC

TYPE	GSM72 390/PR	GSM72 395/PR	GSM72 400PR	GSM72 405PR	GSM72 410PR
Rated Maximum Power(Pmax) [W]	390	395	400	405	410
Open Circuit Voltage(Voc) [V]	49.35	49.64	49.93	50.22	50.51
Maximum Power Voltage(Vmp) [V]	40.21	40.48	40.75	41.04	41.31
Short Circuit Current(Isc) [A]	10.22	10.27	10.32	10.37	10.42
Maximum Power Current(Imp) [A]	9.70	9.76	9.81	9.86	9.91
Module Efficiency [%]	19.8	20.0	20.2	20.4	20.6
Power Tolerance	0~+5W				
Temperature Coefficient of Isc(α _{Isc})	+0.060%/°C				
Temperature Coefficient of Voc(β _{Voc})	-0.300%/°C				
Temperature Coefficient of Pmax(γ _{Pmp})	-0.370%/°C				
STC	Irradiance 1000W/m ² , cell temperature 25°C, AM1.5G				

Remark: Electrical data in this catalog do not refer to a single module and they are not part of the offer. They only serve for comparison among different module types
*For NexTracker installation static loading performance: front load measures 2400Pa, while back load measures 2400Pa

ELECTRICAL PARAMETERS AT NOCT

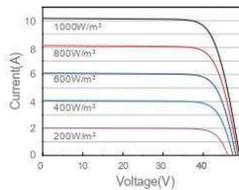
TYPE	GSM72 390/PR	GSM72 395/PR	GSM72 400/PR	GSM72 405/PR	GSM72 410/PR
Rated Max Power(Pmax) [W]	289	292	295	299	302
Open Circuit Voltage(Voc) [V]	46.78	47.09	47.40	47.71	48.02
Max Power Voltage(Vmp) [V]	37.92	38.21	38.41	38.62	38.90
Short Circuit Current(Isc) [A]	8.07	8.11	8.15	8.19	8.23
Max Power Current(Imp) [A]	7.61	7.65	7.69	7.73	7.77
NOCT	Irradiance 800W/m ² , ambient temperature 20°C, wind speed 1m/s, AM1.5G				

OPERATING CONDITIONS

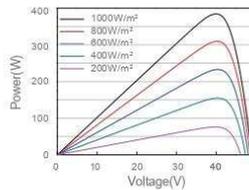
Maximum System Voltage	1000V
Operating Temperature	40°C~+85°C
Maximum Series Fuse	20A
Maximum Static Load,Front*	5400Pa
Maximum Static Load,Back*	2400Pa
NOCT	45±2°C
Application Class	Class A

CHARACTERISTICS

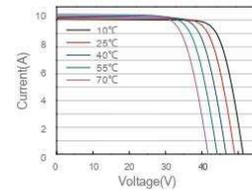
Current-Voltage Curve GSM72-390/PR



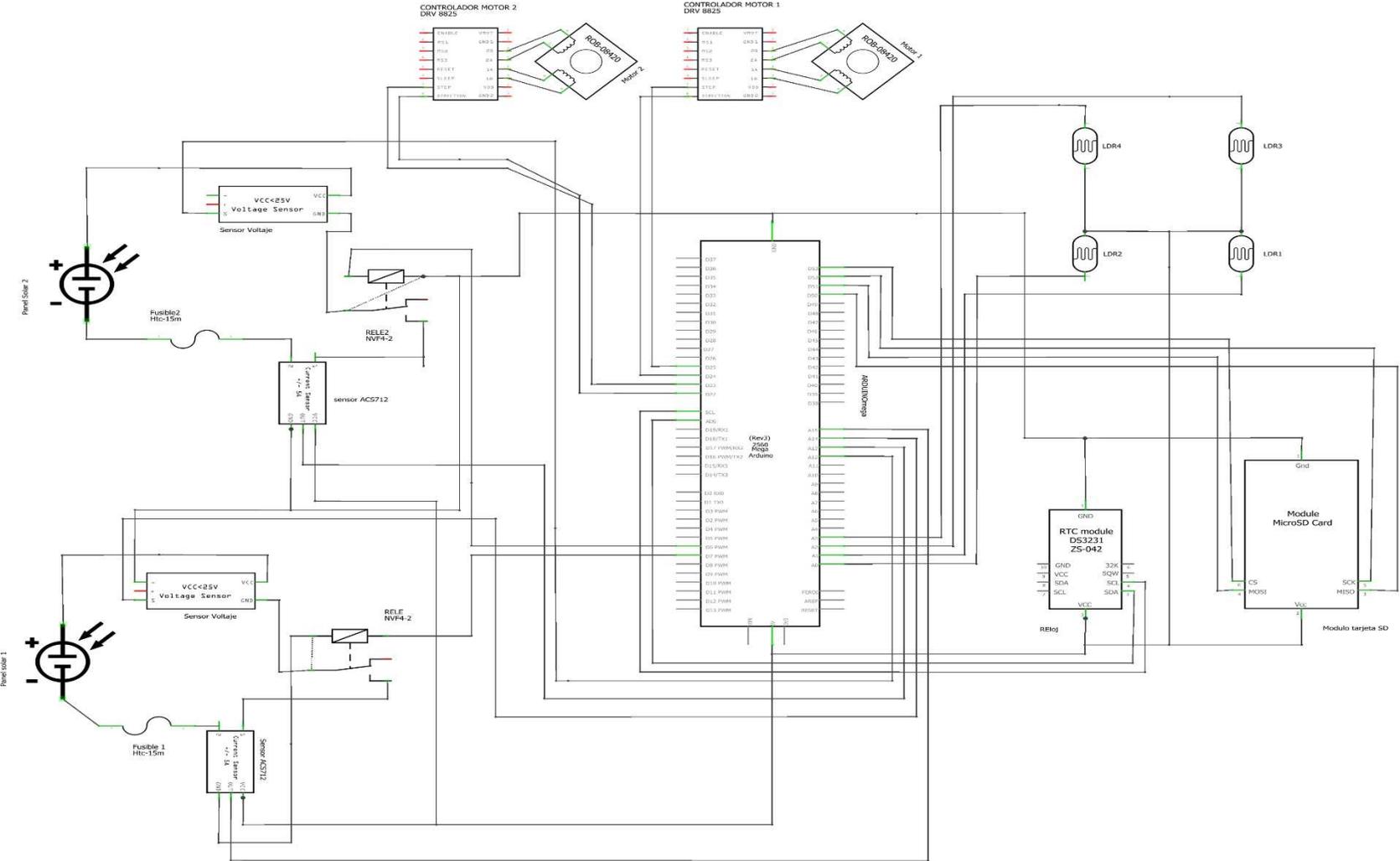
Power-Voltage Curve GSM72-390/PR



Current-Voltage Curve GSM72-390/PR



Anexo 6. Diagrama esquemático de conexión



fritzing

Resumen anual																										
Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Produccion Electricidad(kWh)	-	4544.00	4521.28	4498.67	4476.18	4453.80	4431.53	4409.37	4387.33	4365.39	4343.56	4321.84	4300.24	4278.73	4257.34	4236.05	4214.87	4193.80	4172.83	4151.97	4131.21	4110.55	4090.00	4069.55	4049.20	4028.95
Entradas (\$)																										
Precio electricidad	-	\$0.10	\$0.10	\$0.10	\$0.10	\$0.10	\$0.11	\$0.11	\$0.11	\$0.11	\$0.11	\$0.12	\$0.12	\$0.12	\$0.12	\$0.12	\$0.13	\$0.13	\$0.13	\$0.13	\$0.14	\$0.14	\$0.14	\$0.14	\$0.15	\$0.15
Valor consumo	-	\$442.13	\$447.84	\$453.62	\$459.48	\$465.41	\$471.42	\$477.50	\$483.67	\$489.91	\$496.24	\$502.64	\$509.13	\$515.71	\$522.36	\$529.11	\$535.94	\$542.86	\$549.86	\$556.96	\$564.15	\$571.44	\$578.81	\$586.29	\$593.86	\$601.52
Total (\$)	0	\$442.13	\$447.84	\$453.62	\$459.48	\$465.41	\$471.42	\$477.50	\$483.67	\$489.91	\$496.24	\$502.64	\$509.13	\$515.71	\$522.36	\$529.11	\$535.94	\$542.86	\$549.86	\$556.96	\$564.15	\$571.44	\$578.81	\$586.29	\$593.86	\$601.52
Salidas (\$)																										
Capital	\$3,930.00																									
Baterias									\$350.00							\$350.00						\$350.00				
Motores						\$200.00					\$200.00					\$200.00					\$200.00					\$200.00
Mantenimiento	-	\$40.00	\$40.00	\$40.00	\$40.00	\$40.00	\$40.00	\$40.00	\$40.00	\$40.00	\$40.00	\$40.00	\$40.00	\$40.00	\$40.00	\$40.00	\$40.00	\$40.00	\$40.00	\$40.00	\$40.00	\$40.00	\$40.00	\$40.00	\$40.00	\$40.00
Reserva Reparaciones	-	\$3.93	\$3.93	\$11.79	\$11.79	\$11.79	\$11.79	\$11.79	\$11.79	\$11.79	\$11.79	\$23.58	\$23.58	\$23.58	\$23.58	\$23.58	\$23.58	\$23.58	\$23.58	\$23.58	\$23.58	\$23.58	\$23.58	\$23.58	\$23.58	\$23.58
Total (\$)	\$3,930.00	-\$43.93	-\$43.93	-\$51.79	-\$51.79	-\$251.79	-\$51.79	-\$51.79	-\$401.79	-\$51.79	\$251.79	-\$63.58	-\$63.58	-\$63.58	-\$63.58	-\$613.58	-\$63.58	-\$63.58	-\$63.58	-\$63.58	-\$263.58	-\$63.58	-\$413.58	-\$63.58	-\$63.58	-\$263.58
Resultados(\$)																										
Flujo de caja	\$3,930.00	\$398.20	\$403.91	\$401.83	\$407.69	\$213.62	\$419.63	\$425.71	\$81.88	\$438.12	\$244.45	\$439.06	\$445.55	\$452.13	\$458.78	-\$84.47	\$472.36	\$479.28	\$486.28	\$493.38	\$300.57	\$507.86	\$165.23	\$522.71	\$530.28	\$337.94
Flujo acumulado	\$3,930.00	\$3,531.80	\$3,127.89	\$2,726.06	\$2,318.37	\$2,104.75	\$1,685.13	\$1,259.41	\$1,177.53	\$739.41	\$494.97	-\$55.90	\$389.65	\$841.77	\$1,300.56	\$1,216.08	\$1,688.44	\$2,167.72	\$2,654.00	\$3,147.39	\$3,447.96	\$3,955.82	\$4,121.05	\$4,643.76	\$5,174.03	\$5,511.98

Análisis financiero sistema con seguidor solar