

Diseño e implementación de un prototipo funcional de un sistema fotovoltaico autónomo con seguidor solar para carga de celulares.

Alejandro Hernandez Alzate
Alejandro.hernandez01@usc.edu.co

Camilo Ernesto Chávez Espinosa
Camilo.chavez00@usc.edu.co

Guillermo Alonso Góngora Santana
Guillermo.gongora00@usc.edu.co

Iván Darío Ruiz Hidalgo
Ivan.ruiz01@usc.edu.co

Universidad Santiago de Cali, Facultad de Ingeniería, Programa de ingeniería en energías (1)

Resumen

Este proyecto abarca el diseño e implementación de un prototipo fotovoltaico autónomo que funciona como estación de carga para celulares dentro de la Universidad Santiago de Cali, el sistema cuenta con un mecanismo de seguimiento solar para captar de mejor manera la radiación solar en las diferentes horas del día y así mejorar su eficiencia en comparación con un sistema fotovoltaico estático. Este trabajo se llevó a cabo iniciando por el cálculo de los elementos que componen el sistema con el fin de realizar el diseño en 3D del mecanismo del seguidor solar y su estructura de soporte para finalmente su construcción. El sistema fue probado con éxito registrando datos durante 20 días, donde se pudo evidenciar cómo el sistema con seguimiento logró una eficiencia promedio de un 5% en comparación con uno estático que obtuvo en promedio un 4%, por lo que se comprobó que el sistema con seguimiento tuvo una leve mejoría, pero se consideró muy poco significativa.

Palabras Clave: Radiación solar, prototipo, sistema fotovoltaico, seguimiento solar, eficiencia.

Abstract

This project covers the design and implementation of an autonomous photovoltaic prototype that works as a charging station for cell phones within the Universidad Santiago de Cali, the system has a solar tracking mechanism to better capture solar radiation at different times of the day and thus improve its efficiency compared to a static photovoltaic system. This work was carried out starting with the calculation of the elements that make up the system to perform the 3D design of the solar tracker mechanism and its support structure and finally its construction. The system was successfully tested by recording data for 20 days, where it could be seen how the system with tracking achieved an average efficiency of 5% compared to a static one that obtained an average of 4%, so it was found that the system with tracking had a slight improvement, but it was considered very insignificant.

Keywords: Solar radiation, prototype, photovoltaic system, solar tracking, efficiency.

1. INTRODUCCIÓN

El consumo de energía eléctrica en el mundo está aumentando a lo largo de los años debido al aumento de población y la creciente dependencia de dispositivos electrónicos, principalmente el uso de dispositivos móviles como celulares, y computadores portátiles (Cruz, 2022). Dado a que las principales fuentes convencionales de generación de energías están agotándose, surge la necesidad de aportar a la obtención de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS7) proponiendo tecnologías que ayuden a la obtención de energía que provenga de fuentes renovables como la energía solar, eólica, micro hidráulica y biomasa (Moran, 2023), siendo, la energía solar fotovoltaica una de las que se destaca como la de mayor desarrollo e interés a nivel mundial (Kamarzaman et al., 2022). En países con economías emergentes como Colombia se utiliza principalmente la energía hidroeléctrica, la cual conlleva serios problemas ambientales debido a la modificación de ecosistemas por lo que no se considera del todo ambientalmente amigable a gran escala (McManamay et al., 2023), por lo

que en los últimos años, y en aras de lograr una transición energética, se ha comenzado a usar la energía solar (González-Dumar et al., 2024).

En el mundo, la participación en la producción de electricidad a partir de fuentes renovables es muy baja tan solo con un 28% en comparación con los combustibles fósiles (*Electricity production from fossil fuels, nuclear and renewables.*, 2022.), según la Agencia Internacional de Energía (AIE) se tiene previsto que la producción de energía mediante estas fuentes aumente hasta en un 43% en los próximos diez años a través de tecnologías fotovoltaicas y eólicas (*Renewable Energy Market Update*, 2023). Así mismo, según las cifras de la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) en Colombia la energía solar fotovoltaica aprovechada para suplir la demanda del sistema interconectado Nacional es apenas del 0.01% (Herrera et al., 2020.).

Uno de los retos en el uso de la energía solar es el corto tiempo de exposición de los paneles a los rayos solares debido a su posición estática. El uso estaba limitado porque solo había sistemas estacionarios con un ángulo fijo que impedían una utilización entre 35 y 40% de la energía disponible (Gómez et al., 2015.). Actualmente los sistemas tuvieron un crecimiento en la eficiencia debido al uso de seguidores solares lo que permite que el tiempo de exposición del panel a los rayos del sol aumente de forma considerable (Rajesh et al., 2021).

La Universidad Santiago de Cali (USC) comprometida con la sostenibilidad y la producción de energía limpia cuenta con dos sistemas fotovoltaicos instalados en la azotea de dos edificios dentro del campus universitario, el sistema (A) dispone de una cantidad de 668 paneles solares con una capacidad de 183.7 kWp, mientras que el (B) cuenta con una capacidad de 51.9 kWp y posee una cantidad de 156 paneles los cuales se distribuyen entre 78 policristalinos y 78 monocristalinos (Información proporcionada por la Universidad) sin embargo, no hay actualmente ninguna implementación con paneles solares dentro del campus Pampalinda que esté a disposición directa de la comunidad universitaria para satisfacer las necesidades básicas de los estudiantes como cargar sus celulares. Teniendo en cuenta lo anterior, el presente proyecto tiene como objetivo diseñar e implementar un prototipo funcional de un sistema fotovoltaico con seguimiento solar de un solo eje que funcione mediante intervalos de tiempo para ser usado como estación de carga autónoma de celulares conectados mediante cables a puertos USB dentro del campus de la USC, con este prototipo se busca comprobar la eficiencia y la viabilidad de un seguidor solar en el campus y de esta manera proponer el diseño de un sistema fotovoltaico a gran escala para carga de dispositivos electrónicos dejando sus planos y todos sus componentes para ser implementado en caso de que la universidad lo requiera.

Los sistemas fotovoltaicos autónomos, son muy utilizados en electrificación domiciliar, carga de dispositivos, alumbrado público o señalización para aplicaciones agrícolas. Actualmente se conocen varias implementaciones de este tipo de sistemas enfocados en la carga de dispositivos electrónicos como, por ejemplo, Carrillo & Aselas que implementaron un sistema solar para carga de dispositivos en la Universidad Pontificia Bolivariana en Floridablanca (Carrillo & Aselas, 2020), el sistema cuenta con un panel fotovoltaico policristalino de 290W, un regulador de carga, un sistema de seguimiento solar impulsado por un actuador lineal con un motor DC programado mediante un Arduino y una batería estacionaria de gel de 12V y 100Ah. El sistema tiene la capacidad de cargar 6 dispositivos móviles a la vez y su consumo total de fue de 579 Wh/día. Basado en una toma de datos entre dos sistemas solares uno con seguidor y otro sin seguidor los autores reportan que la potencia generada mejoró significativamente en comparación con un panel posicionado de forma estática. En la universidad Antonio Nariño en Riohacha se realizó un diseño y una simulación sobre un sistema fotovoltaico con seguidor solar para carga de dispositivos electrónico (Acosta & Mendoza, 2020), este proyecto detalla el proceso del diseño de un sistema de seguimiento solar para mejorar la eficiencia de una estación de carga autónoma en comparación con un sistema estático, la estación de carga cuenta con un panel monocristalino de 300W, una batería de 12V y 55Ah, un controlador de carga, un inversor y un motor de DC controlado por una tarjeta Arduino para mover el panel con un sistema de transmisión con poleas y correas que permite orientar el panel de forma perpendicular a los rayos del sol, la estación de carga cuenta con una capacidad para cargar hasta cuatro dispositivos a la vez y el sistema de seguimiento por seis horas al día. Los autores reportan que el sistema con seguimiento aumenta la eficiencia de captación de radiación solar del 18-25% (estático) hasta un 25-45%.

En este contexto y buscando implementar una estación de carga de celulares en la USC, surge la siguiente pregunta

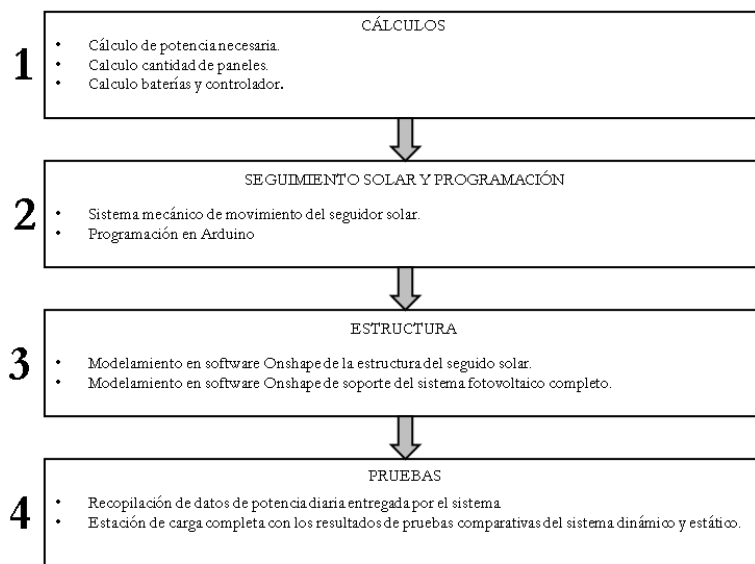
problema. ¿Cómo mejorar la eficiencia energética de un sistema fotovoltaico con seguimiento solar de un solo eje para aumentar el rendimiento de una estación de carga de celulares en la Universidad Santiago de Cali? Teniendo en cuenta la pregunta problema planteada el proyecto se basa en la hipótesis de que la implementación del sistema de seguidor solar mejorará la eficiencia del sistema solar fotovoltaico en comparación a un sistema estático (Batayneh et al., 2019). A lo largo del presente trabajo, se planea verificar si implementar un rastreador solar constituye una ganancia efectiva de energía en comparación con sistema en una estructura estática.

El presente artículo se encuentra distribuido de la siguiente forma: En la segunda sección se encuentra la metodología, los métodos y materiales utilizados para llevar a cabo el proyecto, en la tercera sección se evidencian los resultados obtenidos y, por último, se presentan las conclusiones del estudio.

2. MATERIALES Y MÉTODOS/METODOLOGÍA

Para llevar a cabo este proyecto de construir una estación de carga para la comunidad estudiantil de la USC, se van a realizar múltiples tareas las cuales se muestran de forma general en la ilustración 1.

Ilustración 1. Esquema de metodología aplicada.



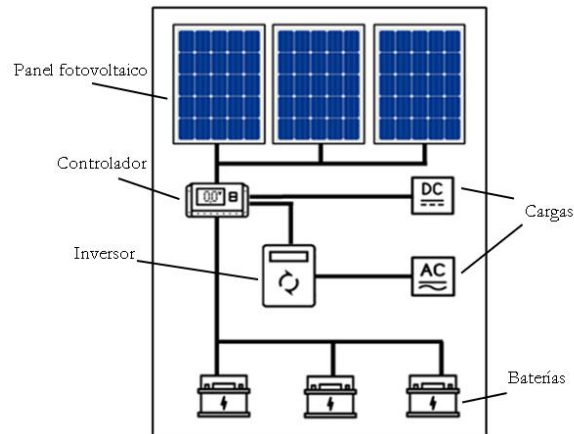
Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se describen paso a paso el diseño experimental que se hará para cumplir los objetivos del proyecto:

2.1. Cálculo del sistema Off-Grid.

Los sistemas fotovoltaicos aislados, o sistemas off-Grid (ilustración 2), son sistemas independientes que almacenan la energía generada por los paneles solares en baterías. Esta energía es regulada mediante un controlador de carga para prevenir sobrecargas y sobredescargas. Debido a su funcionamiento autónomo, estos sistemas suelen instalarse en áreas rurales o en regiones sin acceso a la red eléctrica. (Ceylan & Devrim, 2023).

Ilustración 2 Esquema sistema off-grid.



Fuente: Adaptado de (Regalado & Yolanda, 2018).

2.1.1. Cálculo del número de paneles fotovoltaicos.

Se determinó la cantidad de dispositivos que se alimentarán del sistema y su tiempo de uso aproximado para así conocer la potencia requerida del sistema, teniendo en cuenta la potencia se realizó el cálculo de los paneles fotovoltaicos necesarios mediante la siguiente ecuación (1).

$$N_t = \frac{E * 1.2}{HSP * W_{panel} * Rendimiento} \quad (1)$$

Donde, E es el consumo total diario del sistema, W_{panel} la capacidad del panel seleccionado, 1.2 representa un factor de seguridad, HSP es la hora solar pico y el rendimiento es el factor que contempla las pérdidas del sistema solar.

El valor de la hora solar pico (HSP) depende de la latitud y longitud del lugar donde será instalado el sistema y se puede obtener mediante la página oficial de datos meteorológicos de la NASA. El factor de rendimiento contempla las pérdidas de los dispositivos del sistema solar, para instalaciones autónomas este valor está entre el 65 y 75%.

2.1.2 Cálculo de baterías y controlador.

Se debe conocer la tensión de trabajo del sistema teniendo en cuenta la potencia demandada del sistema, como este es un prototipo solo para la carga de dos celulares se obtuvo una potencia baja por lo que se trabajó con una tensión de 12V, como lo indican Corporales y Ortiz en su estudio, si la potencia demandada es menor a los 1500W la tensión de trabajo es aproximadamente de 12V (Corporales & Ortiz, 2014).

Conociendo la tensión de trabajo del sistema se utilizaron las siguientes ecuaciones para conocer el amperaje de la batería.

$$\frac{Wh}{dia} = \frac{E * dias\ autonomia}{Pd} \quad (2)$$

Donde los días de autonomía son los días en los que el sistema puede seguir proporcionando energía sin que el panel esté en funcionamiento y Pd representa la profundidad de descarga de la batería.

$$\frac{Ah}{día} = \frac{Wh/día}{V_{batería}} \quad (3)$$

Donde $V_{batería}$ representa la tensión de la batería. Para calcular el regulador es necesario conocer la corriente que brinda el número de paneles fotovoltaicos conectados en paralelo y la corriente de cortocircuito de cada uno, con estos valores se calculó la corriente máxima que debe soportar el regulador mediante la siguiente ecuación (4).

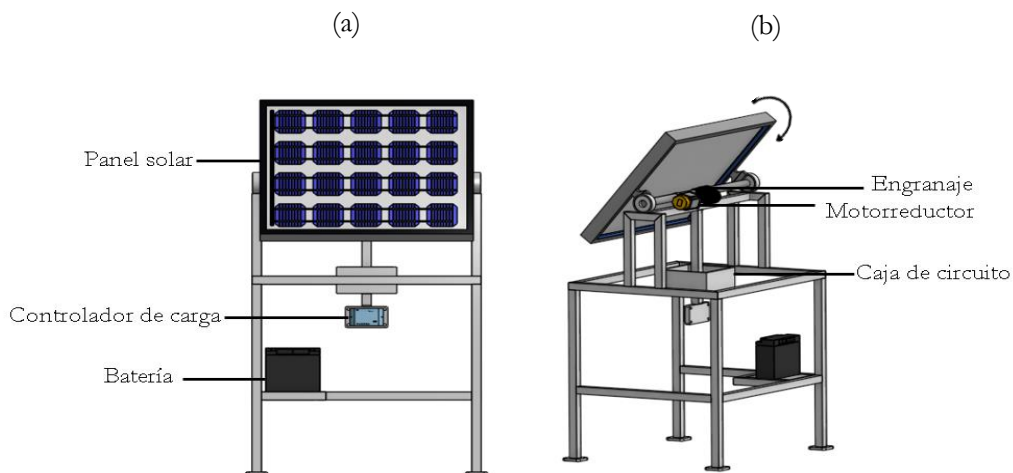
$$I_{in} = 1.2 * I_{sc} * N_{paralelo} \quad (4)$$

Donde, I_{sc} es la corriente en cortocircuito del panel, $N_{paralelo}$ representa el número de paneles conectados en paralelo y el Factor de corrección es igual a 1.2.

2.2. Sistema de seguimiento y diseño de estructura.

El seguidor solar cuenta con una estructura que le permite rotar en un solo eje recibir de mejor manera los rayos del sol, para ello se realizó el modelo de un sistema de movimiento en 3D mediante Onshape con la capacidad de soportar el peso del panel solar. El seguidor solar fue controlado por una tarjeta Arduino Uno implementando un modulo controlador para motores DC, con el fin de realizar los cambios de angulo a lo largo de un día. A continuación en la siguiente ilustración se puede observar el diseño del sistema propuesto.

Ilustración 3 Diseño 3D del sistema fotovoltaico vista frontal (a) vista lateral (b).

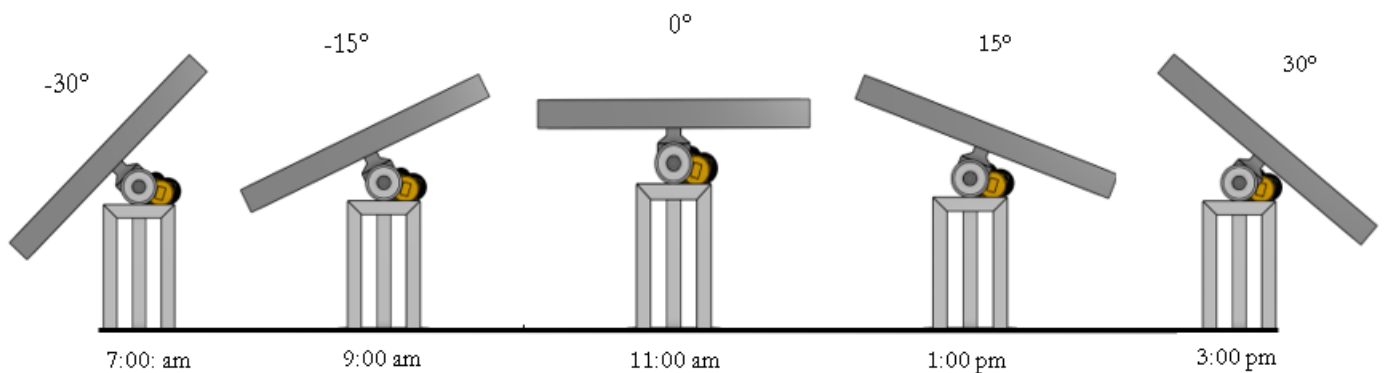


Fuente: Elaboración propia.

Para la rotación del seguidor se tuvo en cuenta el estudio de Barbón *et al.* los cuales propusieron un sistema de seguimiento solar que realiza tres movimientos (Barbón et al., 2021). En este proyecto se decidió optar por un sistema que realice cinco movimientos. También se comprobó mediante la carta solar del lugar que con estos movimientos son suficientes para abarcar toda el área de movimiento disponible para captar la radiación solar en las horas del día (Anexo 10). De esta

forma y con ayuda de un potenciómetro para fijar el posicionamiento de los ángulos se decidió que el panel del sistema inicie con una inclinación de -30° empezando su funcionamiento a las 7:00 am, luego, a las 9:00am el seguidor realizará su primer giro y se desplazará hasta los -15° , posteriormente, el segundo giro será a las 11:00 am, donde se colocará perpendicularmente para aprovechar los rayos del sol en las horas pico a 0° . A la 1:00 pm hará su tercer giro y se posicionará a 15° y a las 3:00pm hará un cuarto giro con una inclinación a 30° con cara hacia el oeste. Su último giro será al retroceder y volver a su posición inicial a las 6:00 pm. En este contexto, la tarjeta arduino se programó como si se tratase de un reloj, de tal forma que a las horas indicadas se realizan los giros anteriormente descritos.

Ilustración 4 Esquema arco de movimiento del panel.



Fuente: Elaboración propia.

2.3. Construcción, pruebas y recopilación de datos.

Una vez diseñada la estructura con el soporte para el seguidor solar y definidos los materiales adecuados, se construyó el sistema completo en una zona elegida en la USC (ilustración 5), la estructura cuenta en su interior con el banco de baterías, la placa Arduino y el controlador, con la estructura ya implementada se realizaron las pruebas correspondientes con el sistema en funcionamiento.

Ilustración 5 Ubicación geográfica y coordenadas donde se implementó el prototipo.



3.403124, -76.548908

Fuente: Tomado de Google Maps.

2.3.1. Pruebas y recopilación de datos.

Para calcular la eficiencia y cuanto aprovecho el sistema con seguimiento es necesaria la radiación solar del lugar donde fue implementado el prototipo, en este caso, debido a que no se cuenta con un piranómetro en la USC se decidió calcular la radiación solar mediante el software PVGIS el cual cuenta con una base de datos meteorológicos. Conociendo la radiación solar, se calcula la radiación solar que llega al panel (R_{panel}) del sistema con la siguiente ecuación.

$$R_{panel} = R_{solar} * A_{panel} \quad (5)$$

Donde, R_{solar} es la radiación solar y A_{panel} es el área del panel solar del prototipo. La comparación de la radiación de un panel con seguidor solar se debe realizar contra el panel estático ubicado en su ángulo óptimo (β_{opt}), el cual se puede calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$\beta_{opt} = 3,7 + 0,69 * \Phi \quad (6)$$

Donde, Φ es la latitud del lugar donde estará el sistema instalado. Después mediante un multímetro digital se registraron los datos de voltaje (V) e intensidad (A) generada por el panel cada media hora y se calculó la potencia en watts. La potencia generada obtenida del panel se pasó de W a Wh suponiendo que es constante cada 30 minutos. A continuación, se observa el sistema fotovoltaico construido en el cual se tomaron los datos.

Ilustración 6 Sistema fotovoltaico autónomo con sus componentes (a) vista completa (b), vista del sistema mecánico de seguimiento.



Fuente: Elaboración propia.

Con la potencia generada por el panel y la radiación solar se calculó la eficiencia del sistema con seguimiento y se comparó con el sistema estático mediante la siguiente ecuación.

$$Eficiencia = \frac{P_{out}}{R_{panel}} \quad (7)$$

Donde, P_{out} es la potencia generada por el panel y R_{panel} corresponde a radiación solar que llega al panel. Una vez recopilados los datos se determinó cuanto energía aprovecho el sistema y de cuanto fue su eficiencia.

Se realizó una prueba T-Student para comprobar si es viable el sistema con seguimiento para el prototipo. Dicha prueba consiste en un análisis estadístico para determinar si existen diferencias significativas entre dos grupos. En este caso utilizamos la generación de energía del sistema estático y la del seguidor solar en los veinte días y se realizó el análisis mediante la siguiente ecuación.

$$Prueba\ T\ de\ muestras\ independientes = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{S^2(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2})}} \quad (8)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se muestran los resultados encontrados del cálculo del sistema fotovoltaico para la estación de carga, así como el análisis de que tan eficiente puede llegar a ser la utilización de un rastreador solar respecto a un panel estático.

3.1 Cálculo del sistema Off-Grid.

Se calculó el consumo y la demanda máxima del sistema considerando los dispositivos que utilizará la estación de carga. Se determinó que el sistema debe ser capaz de cargar dos celulares simultáneamente. Además, el sistema de seguimiento también será alimentado por el panel solar para asegurar su autosuficiencia. Este sistema incluye una placa Arduino y un motor de corriente continua (DC) acoplado a un reductor de 12V. La Tabla 1 muestra el consumo total del sistema.

Tabla 1 Consumo del sistema fotovoltaico.

Dispositivo	Cantidad	Potencia (W)	Horas de uso diario	Consumo total (Wh/día)	Demanda máxima (W)
Celular	2	10	5	100	20
Arduino UNO	1	0,6	24	14,4	0,6
Motorreductor	1	12	1	12	12
Total				126,4	32,6

Fuente: Elaboración propia

3.1.2 Cálculo del número de paneles fotovoltaicos.

Para el cálculo de la cantidad de paneles se calculó la (HSP) para las coordenadas de la USC, para ello se accedió a la página meteorológicos de la NASA donde se obtuvo una HSP de 4.02 kWh/m² para una latitud de 3.4 y una longitud de -76.56. Teniendo los datos de consumo total del sistema y HSP se escogió un panel de 50W para realizar el cálculo, para ello se utilizó la ecuación (1).

$$N_t = \frac{126,4\ Wh/dia * 1.2}{4,02\ kWh/m^2 * 50\ W * 0.7} = 1$$

Con un panel de 50W es suficiente para abastecer el sistema a la hora de cargar dos celulares y su sistema de seguimiento. El panel policristalino de marca Restar solar cuenta con un voltaje pico de 20V, una corriente pico de 2.50A, una corriente de cortocircuito (Isc) de 2,75A y su área es de 0,3618 m². Anexo 3 ficha técnica del panel.

3.1.3 Cálculo de baterías, controlador.

Para el cálculo de las baterías se obtuvo la tensión de trabajo del sistema que está dada en la tabla 4, como la potencia demandada del sistema es menor a 1500W se trabajó con una tensión de 12V, en el caso de los días de autonomía se decidió por medio día (0.5) debido a que el prototipo está diseñado para cargar dos celulares. Conociendo la tensión de trabajo y

los días de autonomía se utilizaron las ecuaciones 2 y 3 para calcular el banco de baterías.

$$\frac{Wh}{dia} = \frac{126,4 Wh/dia * 0,5}{0.5} = 126,4Wh/dia$$

$$\frac{Ah}{dia} = \frac{126,4 Wh/dia}{12V} = 10,5 Ah/dia$$

Se necesita una batería que satisfaga los 10,5 Ah y 12V, para este sistema se utilizó una batería de ácido-plomo regulada por válvula (VRLA) recargable de 12Ah y 12V de la marca Netion. Para el controlador se utilizó la ecuación (2), la corriente de cortocircuito (Isc) se obtuvo de la ficha técnica del panel utilizado.

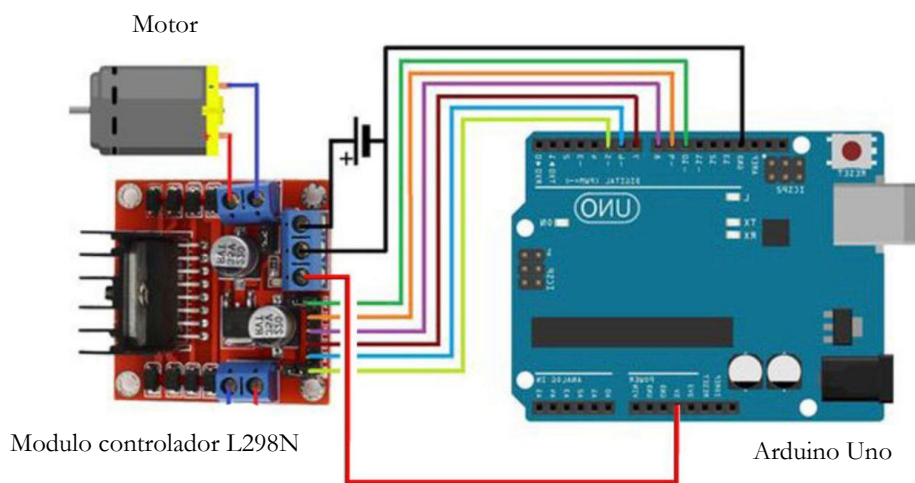
$$I_{in} = 1,2 * 2,75A * 1 = 3,3A$$

Se necesita un controlador de carga que satisfaga los 3A en este caso se optó por un controlador de carga PWM de 10A y 12-24V con dos puertos USB con la capacidad para cargar los dos dispositivos simultáneamente.

3.2. Sistema de seguimiento y diseño de estructura.

El seguidor solar se modeló mediante el software Onshape y consiste en un sistema de rodamientos, que se acopla a una transmisión por engranajes que es accionado por un motor lo que permite el movimiento del panel en un solo eje permitiendo así captar los rayos del sol las diferentes horas del día (Ilustración 3). La tarjeta Arduino Uno se configuró para que funcione como un reloj y así enviar la instrucción de movimiento al motor a las horas anteriormente mencionadas. A continuación, se muestra el esquema de conexiones del circuito en el Arduino.

Ilustración 7 Esquema de conexiones sistema circuito Arduino.



Fuente: Elaboración propia.

3.3. Construcción, pruebas y recopilación de datos.

Se realizó la construcción de la estructura completa con sus componentes y se ubicó en el interior de la USC. En la siguiente ilustración se puede observar ya montada, completa para la recolección de datos y evaluar la ganancia energética de rastrear el sol. El prototipo logró cargar un celular desde el 1% hasta el 100% en dos horas y media aproximadamente y tiene la capacidad para cargar dos celulares a la vez durante 5 horas al día.

Ilustración 8 Sistema fotovoltaico completo vista frontal (a) vista lateral (b).

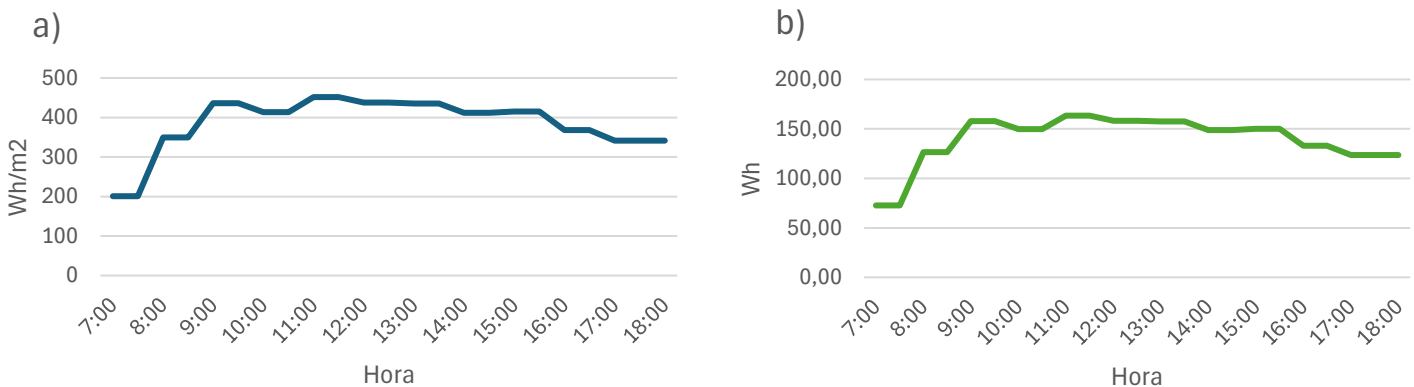


Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. Pruebas y recopilación de datos.

Se obtuvieron los datos de la radiación solar promedio para el mes de julio desde las 7:00am hasta las 6:00pm y se calculó la radiación solar que llega al panel del prototipo con la ecuación 5. En la siguiente ilustración se puede evidenciar las gráficas de la radiación solar y su comportamiento.

Ilustración 9 Grafica radiación solar (a), grafica radiación solar que llega al panel del prototipo (b).



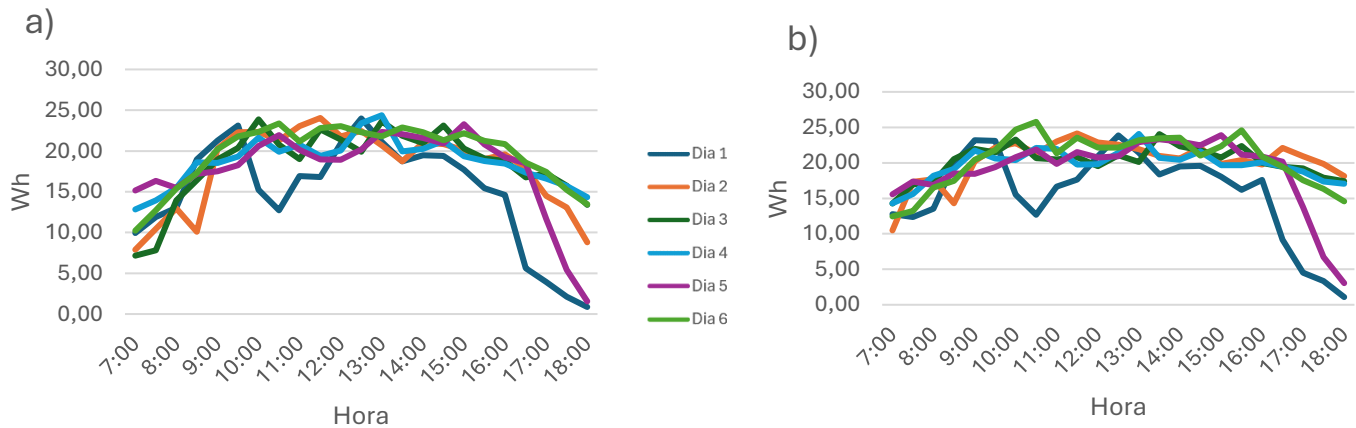
Fuente: Elaboración propia.

Las pruebas del sistema se realizaron durante veinte días con el panel de forma estática y con el seguidor en funcionamiento, para las pruebas con el panel de forma estática se calculó el ángulo óptimo de inclinación del panel con la ecuación (6)

$$B_{opt} = 3.7 + 0.69(3.4) = 6^\circ$$

Conociendo el ángulo óptimo se tomaron datos de voltaje e intensidad generados por el panel solar cada media hora mediante un multímetro digital, con estos datos se calculó la potencia generada por el panel en Wh.

Ilustración 10 Grafica generación panel estático (a) y panel con seguidor (b).



Fuente: Elaboración propia.

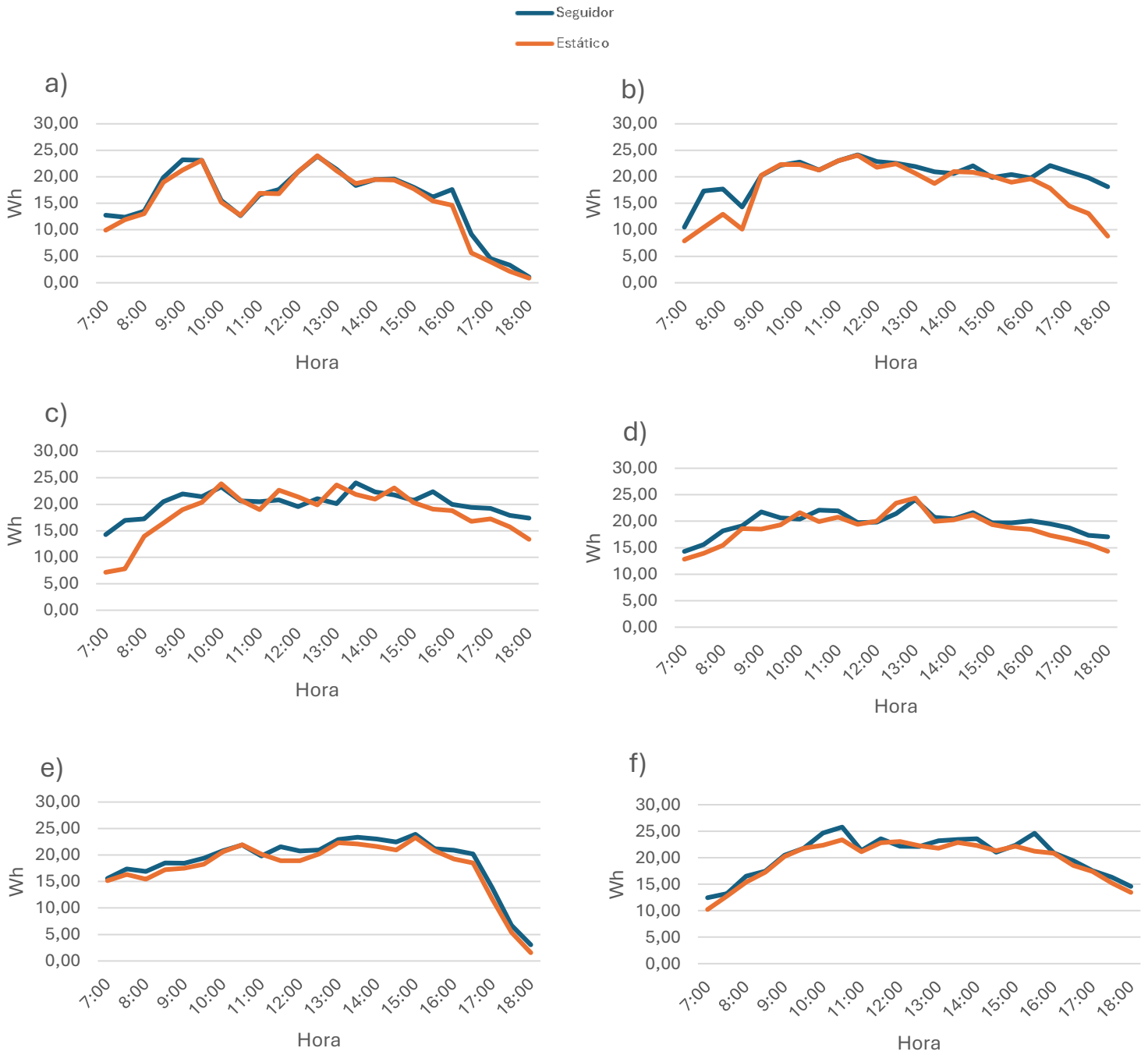
En la Ilustración 11 se puede observar la comparación entre la generación del sistema estático y con seguidor durante los días 1-6 (Ilustración 11a-f). (Anexo 8 graficas para el resto de días). El panel con seguimiento logro levemente una mayor tendencia de generación en comparación con el panel estático principalmente entre las 7:00-9:00 y 16:00-18:00, como se puede observar en las ilustraciones 11b, 11c y 11d. las diferencias no son significativas para el tamaño del panel analizado.

Conociendo la potencia generada del sistema y la radiación solar se realizó el cálculo de la eficiencia haciendo uso de la ecuación (7) para el sistema con seguidor y el sistema estático. La Ilustración 12 muestra la comparación entre la eficiencia del sistema estatico y la eficiencia con seguidor para los días 1-6 (Ilustración 12a-f). Anexo 9 graficas para el resto de días.

En las gráficas mostradas en la Ilustración 12, se observa como el sistema con seguidor logró levemente una mayor eficiencia: en la ilustración 12a entre las 16:00 y 17:00 el seguidor alcanzo un pico máximo de eficiencia del 14% mientras que el estático alcanzo aproximadamente 11%. Por su parte, en la ilustración 12b también se evidencia como el seguidor obtuvo mínimamente una mejor eficiencia en comparación con el estático principalmente en las primeras horas de la mañana donde alcanzo una eficiencia máxima del 14% mientras que el estático logró aproximadamente un 101% y entre las 16:00 y 17:00 donde el sistema con seguidor alcanzo un máximo de 16% y el estático un 12%.

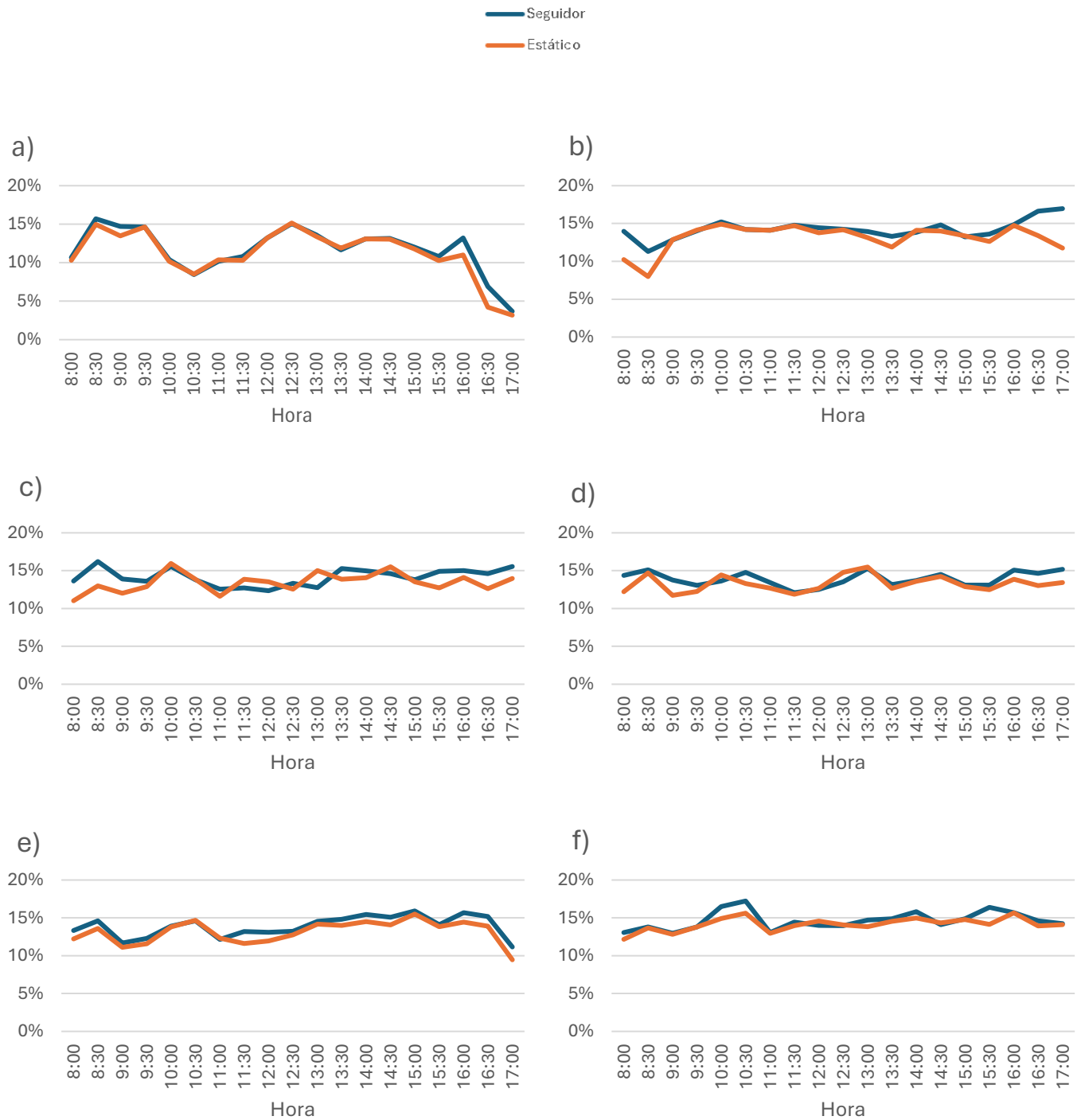
Se analizaron los promedios de eficiencia para cada uno de los días de la toma de datos resultando en un promedio total para el sistema estático del 13% mientras que el sistema con seguidor alcanzo un 14%.

Ilustración 11 Graficas potencia generada de sistema con seguimiento y sistema estatico para seis días.



Fuente: elaboración propia.

Ilustración 12 Graficas eficiencia del sistema estático vs sistema con seguimiento para seis días.



Fuente: elaboración propia.

Inicialmente este proyecto se basó en la hipótesis de que un seguidor solar mejora la generación de energía respecto a uno estático, por lo que en este caso también tendremos presente la hipótesis nula que sería que un seguidor no mejora la generación de energía respecto al estático, teniendo esto en cuenta se realizó la prueba T-Student, Con este análisis, mediante la ecuación (8) podremos determinar si rechazamos o no esta hipótesis nula. Si los valores que nos da la ecuación son mayores 0,05 no rechazamos la hipótesis nula y consideramos que no habrá diferencias significativas. Si son menores a 0,05 se rechaza la hipótesis nula.

Tabla 2 Análisis estadístico prueba T-Student para la generación de energía del sistema estático y con seguidor.

Días	P
Día 1	0,70
Día 2	0,07
Día 3	0,10
Día 4	0,18
Día 5	0,48
Día 6	0,47

Fuente: elaboración propia

En este caso se puede observar que los valores para cada día fueron mayores a 0,05 por lo que se reafirma que el prototipo con seguidor no mostro diferencias significativas.

4. CONCLUSIONES

Se diseño una estación de carga de celulares para ser implementado en la USC. Adicionalmente se realizaron pruebas para determinar si la implementación de un rastreador solar de un eje presenta mejoras en cuanto a la captación solar y por ende en la generación de energía.

Mediante las diferentes pruebas que se hicieron para diferentes días se comprobó que el sistema con seguimiento mostro una pequeña mejoría en la generación de energía y en su eficiencia en comparación con el sistema estático en ciertas horas del día, en la ilustración 11a el sistema con el panel en movimiento logró una eficiencia de aproximadamente un 18% en las horas de la tarde entre las 16 y 16:30 mientras que el panel estático obtuvo una eficiencia máxima del 15%, por otro lado en la ilustración 11b se logró una eficiencia máxima del 15% para el panel en movimiento en la mañana mientras que el estático logró una eficiencia de alrededor del 12%, el promedio total de eficiencia para todos los días en los que se tomaron datos fue del 5% para el sistema con seguimiento mientras que el sistema estático alcanzo un 4%, sin embargo, mediante un análisis estadístico se comprobó que la diferencia no fue significativa ya que solo fue para algunos momentos puntuales, por lo que se concluyó que no es recomendable un seguidor solar en la Universidad Santiago de Cali para el área del panel involucrado (0,3618 m²).

En el desarrollo de este proyecto uno de los aspectos fundamentales para comprobar si realmente es eficiente el sistema con seguimiento en comparación con el sistema estático es la radiación solar, como en este caso no se contaba con un piranómetro ni con los equipos necesarios para hacer la medición con exactitud se optó por calcular la radiación promedio del lugar mediante PVGIS por lo que puede que el cálculo del rendimiento del sistema se vea afectado. Se recomienda para futuras investigaciones implementar un sistema que permita realizar una medición de la radiación solar de una forma más precisa.

Se recomienda que para investigaciones futuras se implemente el piranómetro en el estudio y se hagan las pruebas correspondientes para al menos un año y así comprobar cuanto puede aprovechar realmente el sistema con el seguidor.

También se recomienda verificar el número de movimientos del seguidor y realizar el estudio con un sistema de dos ejes ya que podría mejorar el rendimiento del sistema.

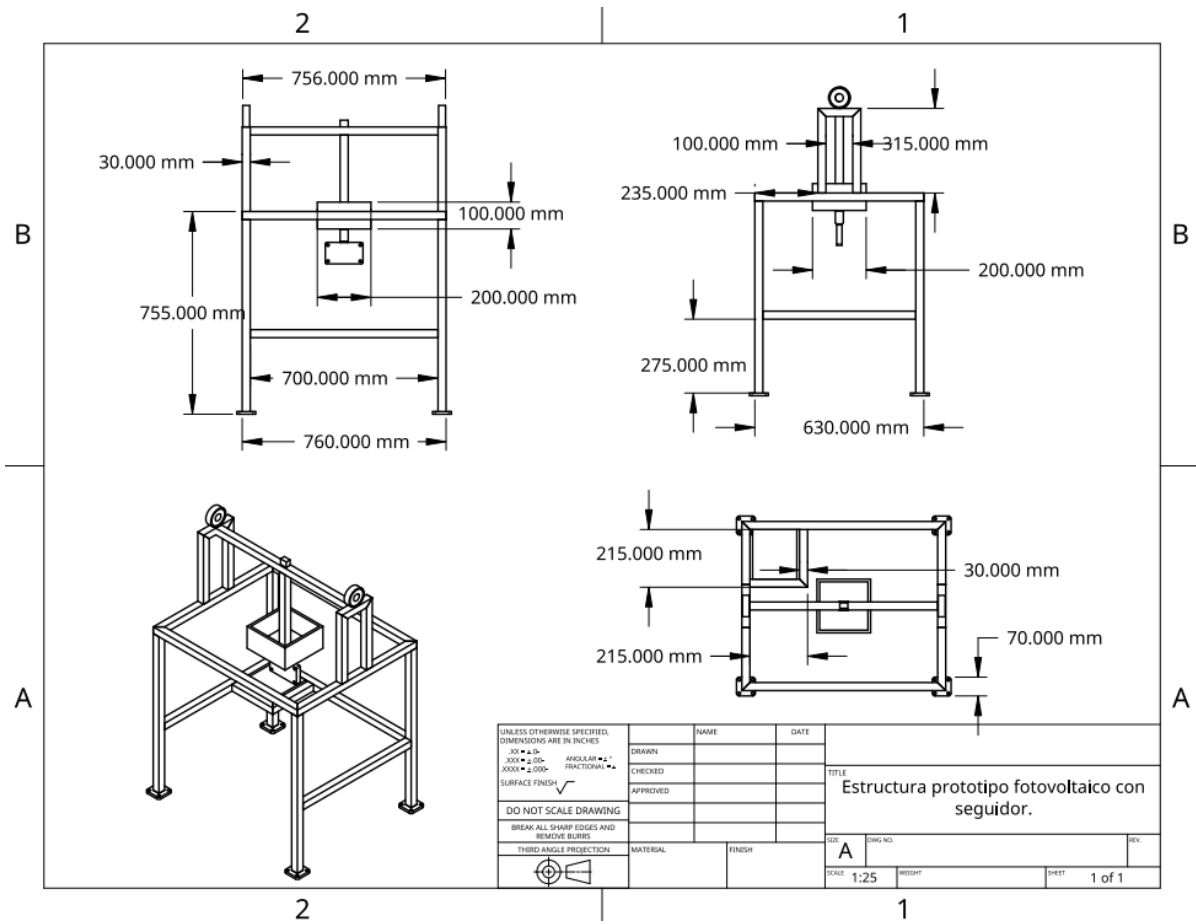
Por último, aunque el prototipo con seguimiento que se desarrolló no mostro una mejora significativa, el proyecto fue un éxito en cuanto a desarrollo, implementación, aprendizaje y los resultados obtenidos proporcionan una base para futuras investigaciones.

5. REFERENCIAS

- Acosta, E. L. D., & Mendoza, K. L. G. (2020). Diseño de seguidor solar aplicado en estación fotovoltaica para recargar dispositivos portátiles en la Universidad Antonio Nariño.
- Barbón, A., Fernández-Rubiera, J. A., Martínez-Valledor, L., Pérez-Fernández, A., & Bayón, L. (2021). Design and construction of a solar tracking system for small-scale linear Fresnel reflector with three movements. *Applied Energy*, 285, 116477. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116477>
- Batayneh, W., Bataineh, A., Soliman, I., & Hafees, S. A. (2019). Investigation of a single-axis discrete solar tracking system for reduced actuations and maximum energy collection. *Automation in Construction*, 98, 102-109. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.011>
- Carrillo, L. F. D., & Aselas, J. S. P. (s. f.). DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE SEGUIMIENTO SOLAR DE UN EJE EN UNA ESTACIÓN DE CARGA DE CELULARES UTILIZANDO PANELES SOLARES.
- Ceylan, C., & Devrim, Y. (2023). Green hydrogen based off-grid and on-grid hybrid energy systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, S0360319923007590. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.02.031>
- Corporales, L. H., & Ortiz, A. U. (s. f.). DISEÑO DE UN CIRCUITO CARGADOR DE BATERÍAS PARA PANEL SOLAR CON SEGUIMIENTO DEL PUNTO ÓPTIMO DE CARGA.
- Cruz, A. I. (2022). Uso de Dispositivos Electrónicos en las Actividades Laborales durante la Pandemia COVID-19. 14(7). Electricity production by source. (s. f.). Our World in Data. Recuperado 29 de septiembre de 2023, de <https://ourworldindata.org/grapher/electricity-prod-source-stacked>
- Electricity production from fossil fuels, nuclear and renewables. (s. f.). Our World in Data. Recuperado 10 de agosto de 2023, de <https://ourworldindata.org/grapher/elec-fossil-nuclear-renewables>



- Gómez, R. A., Nolasco, A. Q., Popoca, M. C., & Vinaja, Á. B. (s. f.). Diseño, construcción y evaluación de un sistema de seguimiento solar para un panel fotovoltaico* Design, construction and evaluation of a solar tracking system for a photovoltaic panel.
- González-Dumar, A., Arango-Aramburo, S., & Correa-Posada, C. M. (2024). Quantifying power system flexibility for the energy transition in Colombia. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 155, 109614. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109614>
- Hassan, Q. (2021). Evaluation and optimization of off-grid and on-grid photovoltaic power system for typical household electrification. *Renewable Energy*, 164, 375-390. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.008>
- Herrera, J. F. M. (s. f.). DISEÑO DE UN SISTEMA ELÉCTRICO PARA CARGA DE BATERÍAS DE CELULARES USANDO UN PANEL FOTOVOLTAICO.
- Kamarzaman, N. A., Sulaiman, S. I., Yassin, A. I. M., Zainuddin, H., & Ibrahim, I. R. (2022). A modified honey badger algorithm for optimal sizing of an AC coupled stand-alone photovoltaic–battery system. *Energy Reports*, 8, 902-909. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.316>
- Kuttybay, N., Mekhilef, S., Koshkarbay, N., Saymbetov, A., Nurgaliyev, M., Dosymbetova, G., Orynbassar, S., Yershov, E., Kapparova, A., Zholamanov, B., & Bolatbek, A. (2024). Assessment of solar tracking systems: A comprehensive review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 68, 103879. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103879>
- Mamodiya, U., & Tiwari, N. (2023). Dual-axis solar tracking system with different control strategies for improved energy efficiency. *Computers and Electrical Engineering*, 111, 108920. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2023.108920>
- McManamay, R. A., Larson, K., Tagestad, J., Jager, H. I., DeRolph, C. R., & Bevelhimer, M. S. (2023). Mutually beneficial outcomes for hydropower expansion and environmental protection at a basin scale. *Science of The Total Environment*, 896, 165298. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165298>
- Moran, M. (s. f.). Energía. Desarrollo Sostenible. Recuperado 29 de junio de 2024, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>
- Rajesh, T., Tamilselvan, K. S., Vijayalakshmi, A., Narendra Kumar, Ch., & Anitha Reddy, K. (2021). Design and implementation of an automatic solar tracking system for a monocrystalline silicon material panel using MPPT algorithm. *Materials Today: Proceedings*, 45, 1783-1789. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.635>
- Regalado, A., & Yolanda, M. (s. f.). Método de detección de puntos calientes en paneles solares. *Renewable Energy Market Update—June 2023*. (2023).

ANEXO 2. PLANOS DE LA ESTRUCTURA DEL PROTOTIPO Y EL SEGUIDOR.




Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 3. FICHA TECNICA PANEL UTILIZADO.





Model Type	RTM050P
Electrical Characteristics	
Rated-Maximum Power (Pmax)	50W
Power Tolerance Range	0~+5W
Open Circuit Voltage (Voc)	24.60V
Peak Voltage (Vmp)	20.00V
Short Circuit Current (Isc)	2.75A
Peak Current (Imp)	2.50A
Max. System Voltage	1000V
Max. Series Fuse Rating	15A
Module Application	ClassA
Dimension	670*540*25mm
All technical data at standard test condition: Am1.5 , E=1000W/m ² , Tc=25C	



Warning / Electrical Hazard

- This module produces electricity when exposed to light.
- Follow all applicable electricity safety precautions.
- Only qualified personnel should install or perform maintenance work on these.
- Be aware of high dangerous high DC voltage when connecting modules.
- Do not damage or scratch the rear surface of the modules.
- Do not handle or install modules when they are wet.
- Follow the battery manufacturer's recommendations if batteries are used with.



E:info@restarsolar.com W:www.restarsolar.com Made in PRC

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 4. EVIDENCIAS DE TOMA DE DATOS Y PROTOTIPO EN FUNCIONAMIENTO.



Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 5. TABLAS PROMEDIO DE RADIACIÓN SOLAR PARA EL MES DE JULIO EN EL LUGAR Y EN EL PANEL DEL PROTOTIPO.

Hora	Radiación solar (W/m ²)	Radiación solar en panel (W)
7:00	200,79	72,65
7:30	200,79	72,65
8:00	349,75	126,54
8:30	349,75	126,54
9:00	436,05	157,76
9:30	436,05	157,76
10:00	413,66	149,66
10:30	413,66	149,66
11:00	451,59	163,39
11:30	451,59	163,39
12:00	437,67	158,35
12:30	437,67	158,35
13:00	435,33	157,50
13:30	435,33	157,50
14:00	411,70	148,95
14:30	411,70	148,95
15:00	415,15	150,20
15:30	415,15	150,20
16:00	367,86	133,09
16:30	367,86	133,09
17:00	341,40	123,52
17:30	341,40	123,52
18:00	341,40	123,52

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 6. TABLAS POTENCIA GENERADA POR EL PANEL DEL PROTOTIPO ESTÁTICO PARA CADA DÍA.

Día 1

Hora	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia generada W
7:00	16,57	1,2	19,88
7:30	17,76	1,34	23,80
8:00	19,78	1,32	26,11
8:30	20,06	1,89	37,91
9:00	20,26	2,1	42,55
9:30	20,1	2,3	46,23
10:00	17,9	1,7	30,43
10:30	18,19	1,4	25,47
11:00	19,9	1,7	33,83
11:30	19,78	1,7	33,63
12:00	19,93	2,1	41,85
12:30	19,99	2,4	47,98
13:00	20,11	2,1	42,23
13:30	19,73	1,9	37,49
14:00	19,99	1,95	38,98
14:30	20,22	1,92	38,82
15:00	20,25	1,75	35,44
15:30	19,78	1,56	30,86
16:00	19,75	1,48	29,23
16:30	10,21	1,1	11,23
17:00	9,81	0,8	7,85
17:30	5,23	0,82	4,29
18:00	2,89	0,6	1,73

Día 2

Hora	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia generada W
7:00	16,96	0,93	15,77
7:30	17,4	1,2	20,88
8:00	18,23	1,42	25,89
8:30	19,07	1,06	20,21
9:00	20,1	2,02	40,60
9:30	20,85	2,14	44,62
10:00	20,02	2,23	44,64
10:30	18,75	2,27	42,56
11:00	19,85	2,32	46,05
11:30	19,16	2,51	48,09
12:00	19,19	2,27	43,56
12:30	19,45	2,31	44,93
13:00	19,14	2,16	41,34
13:30	18,93	1,98	37,48
14:00	19,18	2,19	42,00
14:30	19,21	2,17	41,69
15:00	19,23	2,09	40,19
15:30	18,89	2,01	37,97
16:00	18,67	2,1	39,21
16:30	18,21	1,96	35,69
17:00	16,57	1,75	29,00
17:30	16,45	1,59	26,16
18:00	15,02	1,17	17,57

Día 3

Hora	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia generada W
7:00	15,57	0,92	14,32
7:30	16,1	0,97	15,62
8:00	17,89	1,56	27,91
8:30	18,35	1,79	32,85
9:00	18,87	2,01	37,93
9:30	19,21	2,12	40,73
10:00	20,32	2,35	47,75
10:30	19,42	2,14	41,56
11:00	18,34	2,07	37,96
11:30	19,7	2,3	45,31
12:00	19,82	2,16	42,81
12:30	20,09	1,98	39,78
13:00	20,21	2,34	47,29
13:30	20,23	2,16	43,70
14:00	19,97	2,1	41,94
14:30	19,92	2,32	46,21
15:00	20,01	2,03	40,62
15:30	19,38	1,97	38,18
16:00	19,26	1,95	37,56
16:30	18,75	1,79	33,56
17:00	18,34	1,88	34,48
17:30	17,39	1,81	31,48
18:00	16,21	1,65	26,75

Día 4

Hora	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia generada W
7:00	16,24	1,58	25,66
7:30	16,89	1,65	27,87
8:00	16,53	1,87	30,91
8:30	18,78	1,98	37,18
9:00	18,99	1,95	37,03
9:30	19,23	2,01	38,65
10:00	19,56	2,21	43,23
10:30	19,43	2,05	39,83
11:00	19,77	2,1	41,52
11:30	20,11	1,93	38,81
12:00	20,45	1,96	40,08
12:30	20,35	2,3	46,81
13:00	20,15	2,42	48,76
13:30	20,06	1,99	39,92
14:00	19,57	2,07	40,51
14:30	20,21	2,1	42,44
15:00	19,87	1,95	38,75
15:30	19,53	1,92	37,50
16:00	19,03	1,94	36,92
16:30	18,56	1,87	34,71
17:00	18,23	1,82	33,18
17:30	17,65	1,78	31,42
18:00	16,76	1,71	28,66

Día 5

Hora	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia generada W
7:00	17,23	1,76	30,32
7:30	17,45	1,87	32,63
8:00	17,87	1,73	30,92
8:30	18,21	1,89	34,42
9:00	18,34	1,91	35,03
9:30	18,74	1,95	36,54
10:00	19,46	2,12	41,26
10:30	19,96	2,2	43,91
11:00	19,46	2,07	40,28
11:30	19,43	1,95	37,89
12:00	19,21	1,97	37,84
12:30	19,78	2,04	40,35
13:00	20,2	2,21	44,64
13:30	20,34	2,17	44,14
14:00	20,48	2,11	43,21
14:30	20,13	2,08	41,87
15:00	20,07	2,32	46,56
15:30	19,34	2,15	41,58
16:00	19,83	1,94	38,47
16:30	18,96	1,95	36,97
17:00	12,23	1,91	23,36
17:30	11,41	0,95	10,84
18:00	6,23	0,5	3,12

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 7. TABLAS POTENCIA GENERADA POR EL PANEL DEL PROTOTIPO CON SEGUIDOR PARA CADA DÍA.

Día 1

Hora	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia generada W
7:00	17,01	1,5	25,52
7:30	17,67	1,4	24,74
8:00	19,73	1,37	27,03
8:30	21,02	1,89	39,73
9:00	20,16	2,3	46,37
9:30	20,1	2,3	46,23
10:00	17,97	1,73	31,09
10:30	18,09	1,4	25,33
11:00	19,92	1,67	33,27
11:30	19,58	1,8	35,24
12:00	19,93	2,1	41,85
12:30	19,89	2,4	47,74
13:00	20,31	2,11	42,85
13:30	19,63	1,87	36,71
14:00	19,99	1,95	38,98
14:30	20,27	1,93	39,12
15:00	20,15	1,79	36,07
15:30	20,78	1,56	32,42
16:00	19,75	1,78	35,16
16:30	12,21	1,5	18,32
17:00	10,81	0,84	9,08
17:30	7,23	0,92	6,65
18:00	3,01	0,72	2,17

Día 2

Hora	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia generada W
7:00	18,23	1,15	20,96
7:30	18,52	1,87	34,63
8:00	19,98	1,77	35,36
8:30	20,14	1,42	28,60
9:00	20,12	2,01	40,44
9:30	20,43	2,17	44,33
10:00	20,42	2,23	45,54
10:30	18,75	2,27	42,56
11:00	19,85	2,32	46,05
11:30	19,16	2,52	48,28
12:00	19,73	2,32	45,77
12:30	19,78	2,28	45,10
13:00	19,76	2,22	43,87
13:30	19,23	2,18	41,92
14:00	19,26	2,14	41,22
14:30	19,12	2,31	44,17
15:00	19,01	2,09	39,73
15:30	18,99	2,15	40,83
16:00	19,11	2,07	39,56
16:30	19,23	2,3	44,23
17:00	19,05	2,2	41,91
17:30	18,98	2,09	39,67
18:00	18,21	1,99	36,24

Día 3

Hora	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia generada W
7:00	18,53	1,54	28,54
7:30	18,97	1,79	33,96
8:00	19,07	1,81	34,52
8:30	19,53	2,1	41,01
9:00	19,69	2,23	43,91
9:30	19,42	2,21	42,92
10:00	19,9	2,34	46,57
10:30	18,94	2,18	41,29
11:00	19,7	2,08	40,98
11:30	19,73	2,11	41,63
12:00	20,16	1,94	39,11
12:30	20,27	2,08	42,16
13:00	20,21	1,99	40,22
13:30	20,38	2,36	48,10
14:00	20,21	2,21	44,66
14:30	20,25	2,15	43,54
15:00	19,86	2,09	41,51
15:30	20,08	2,23	44,78
16:00	19,78	2,02	39,96
16:30	19,72	1,97	38,85
17:00	18,92	2,03	38,41
17:30	18,56	1,93	35,82
18:00	18,23	1,91	34,82

Día 4

Hora	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia generada W
7:00	17,12	1,67	28,59
7:30	17,34	1,8	31,21
8:00	18,56	1,96	36,38
8:30	18,94	2,02	38,26
9:00	19,5	2,23	43,49
9:30	19,45	2,12	41,23
10:00	19,42	2,1	40,78
10:30	19,83	2,23	44,22
11:00	20,23	2,17	43,90
11:30	20,47	1,93	39,51
12:00	20,32	1,95	39,62
12:30	20,22	2,12	42,87
13:00	19,98	2,41	48,15
13:30	20,51	2,02	41,43
14:00	20,03	2,04	40,86
14:30	20,3	2,13	43,24
15:00	19,89	1,98	39,38
15:30	20,08	1,96	39,36
16:00	19,97	2,01	40,14
16:30	20,09	1,94	38,97
17:00	19,65	1,91	37,53
17:30	18,96	1,83	34,70
18:00	18,12	1,88	34,07

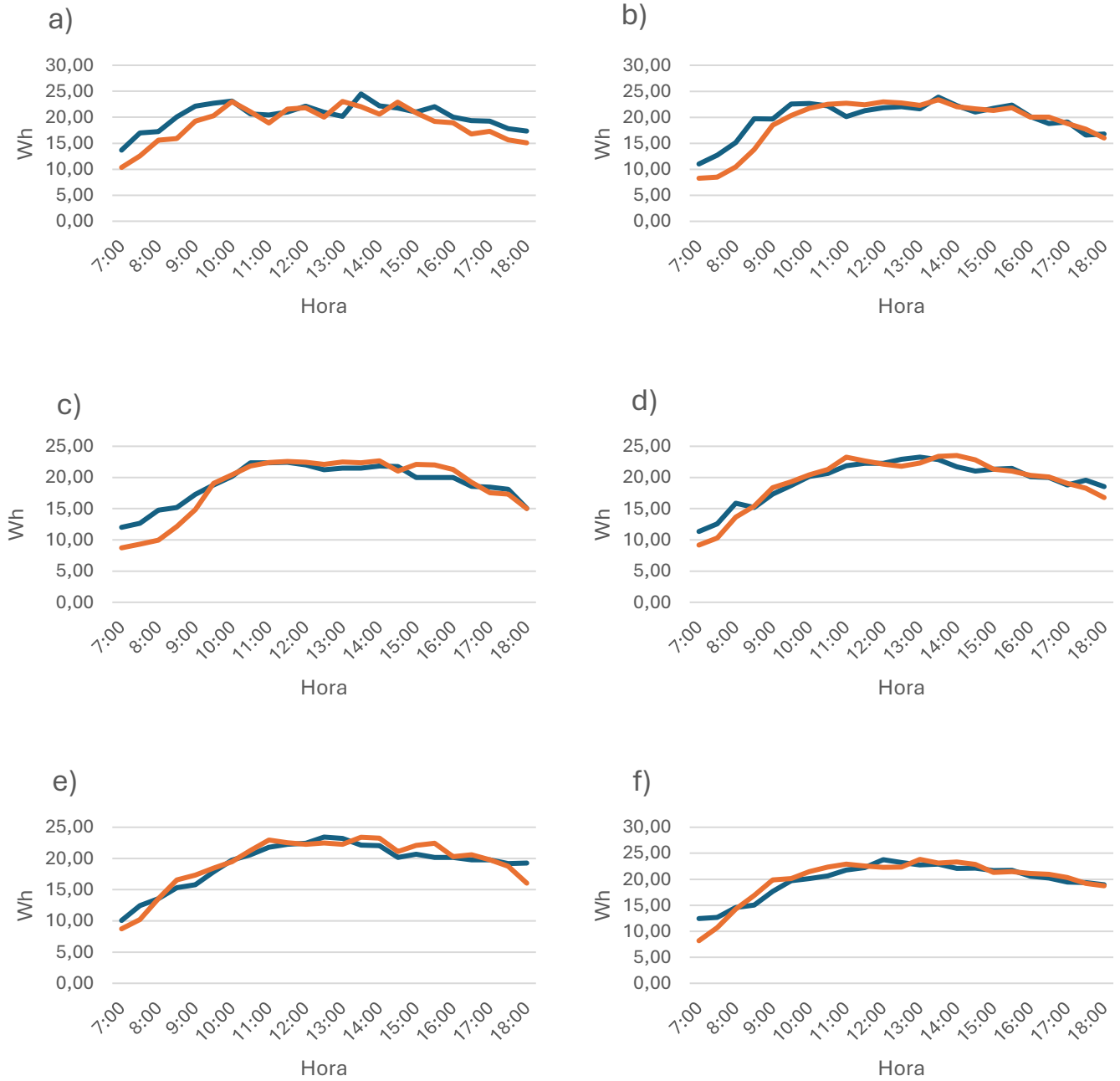
Día 5

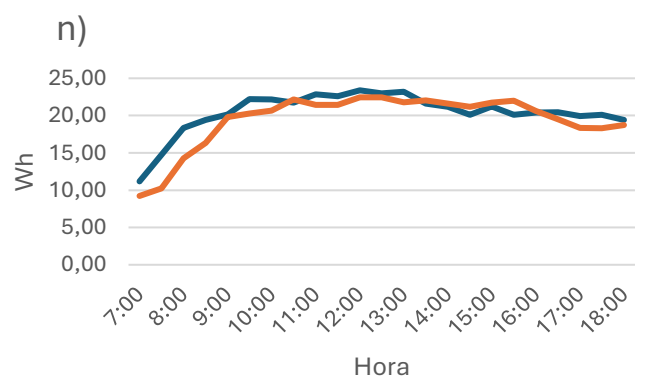
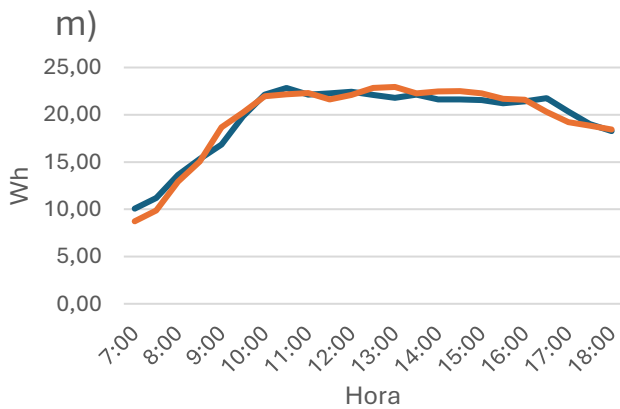
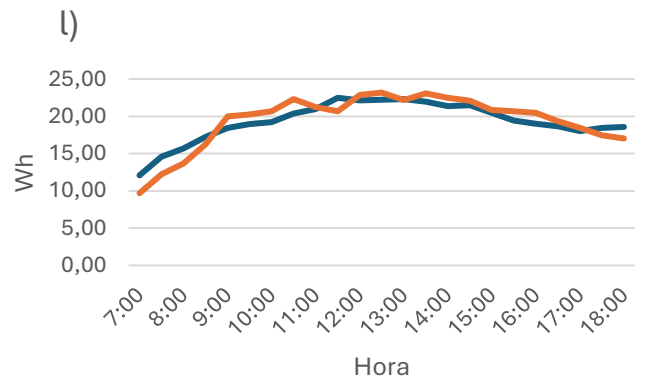
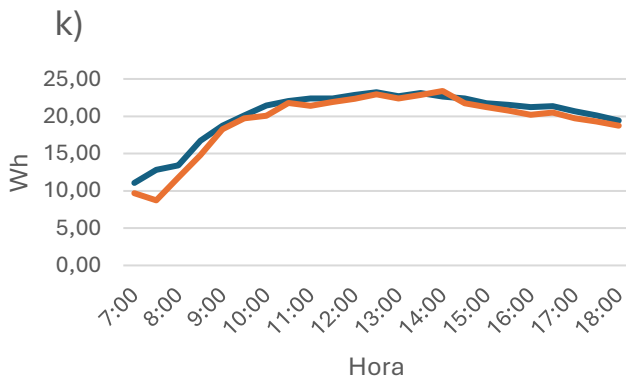
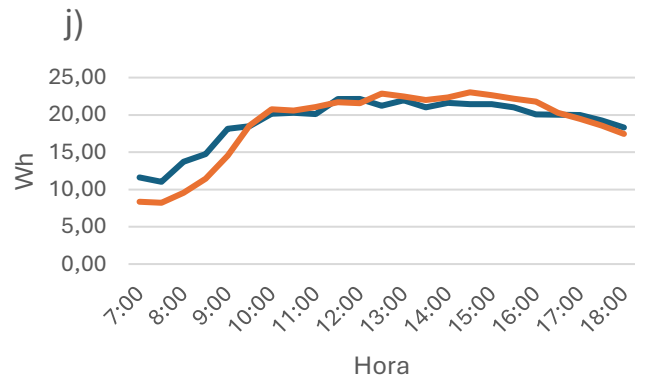
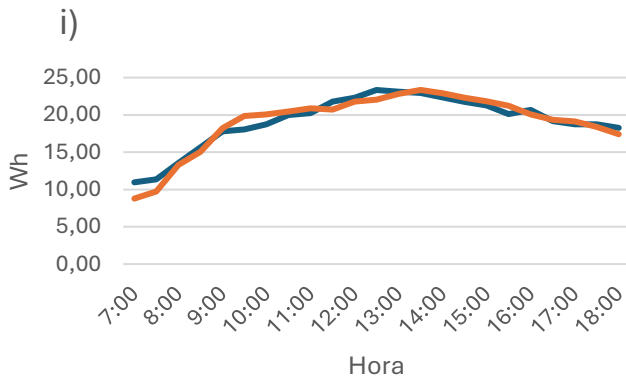
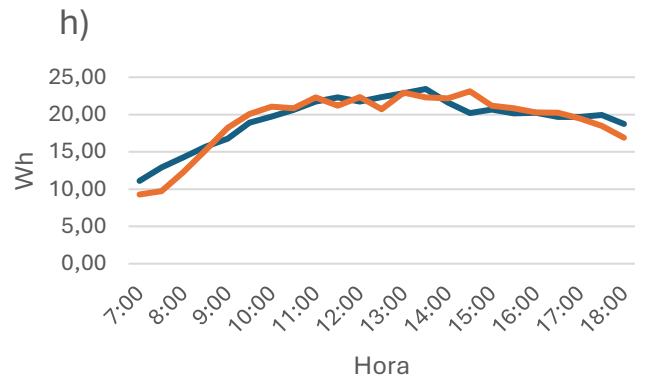
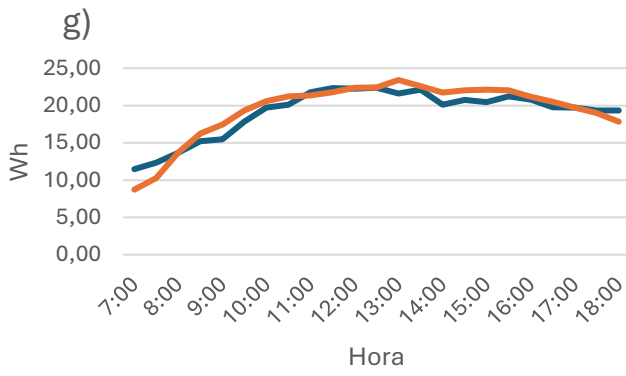
Hora	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia generada W
7:00	17,99	1,73	31,12
7:30	18,21	1,91	34,78
8:00	18,45	1,83	33,76
8:30	18,97	1,95	36,99
9:00	19,11	1,93	36,88
9:30	19,3	2,01	38,79
10:00	19,35	2,15	41,60
10:30	19,53	2,24	43,75
11:00	19,44	2,04	39,66
11:30	19,85	2,17	43,07
12:00	19,75	2,1	41,48
12:30	19,75	2,12	41,87
13:00	20,1	2,28	45,83
13:30	20,38	2,29	46,67
14:00	20,47	2,25	46,06
14:30	20,22	2,22	44,89
15:00	20,26	2,36	47,81
15:30	20,07	2,11	42,35
16:00	19,99	2,09	41,78
16:30	20,08	2,01	40,36
17:00	13,64	2,02	27,55
17:30	11,21	1,2	13,45
18:00	7,01	0,87	6,10

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO 8. GRAFICAS POTENCIA GENERADA PANEL CON SEGUIDOR VS ESTÁTICO PARA EL RESTO DE LOS DÍAS.

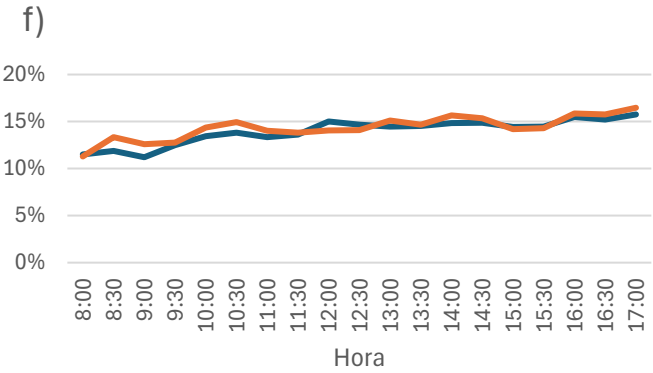
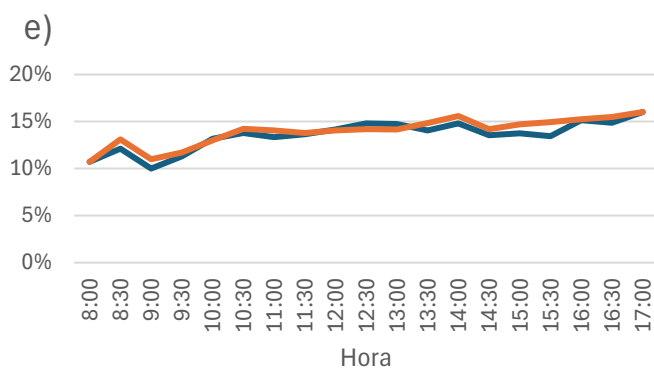
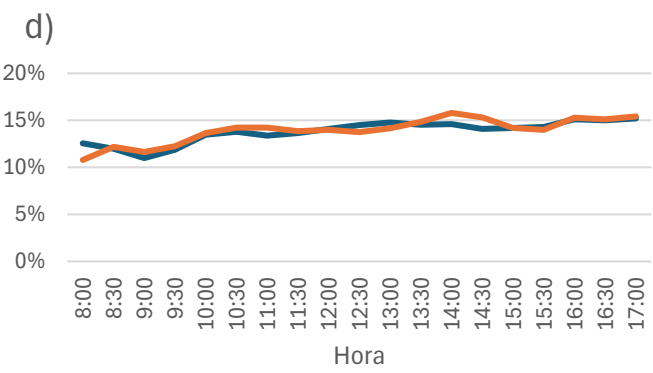
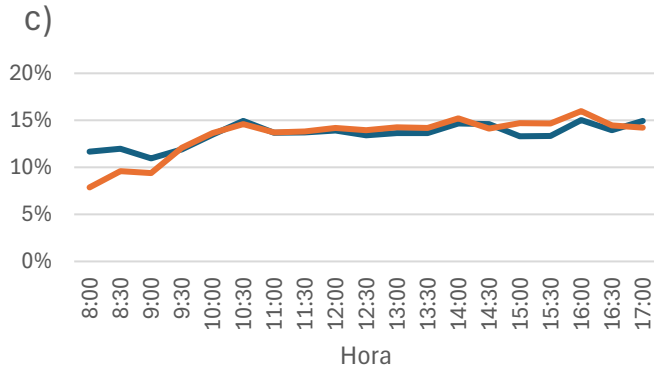
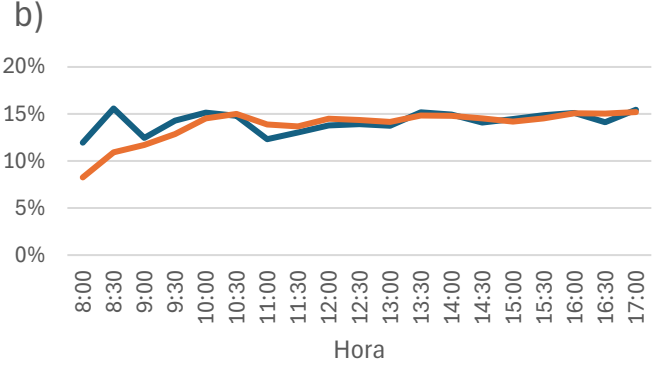
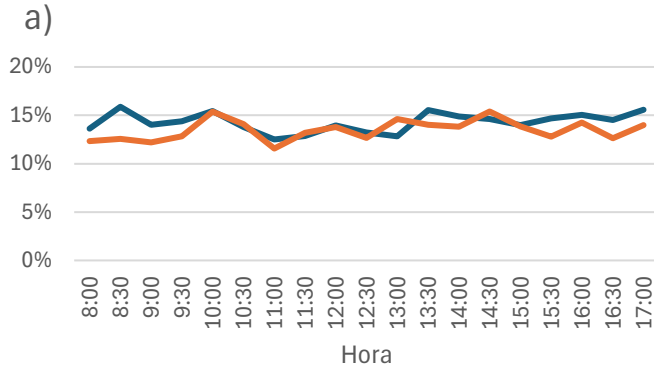
— Seguidor
— Estático

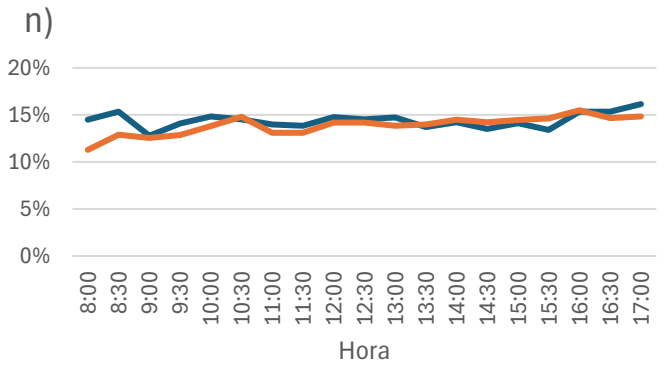
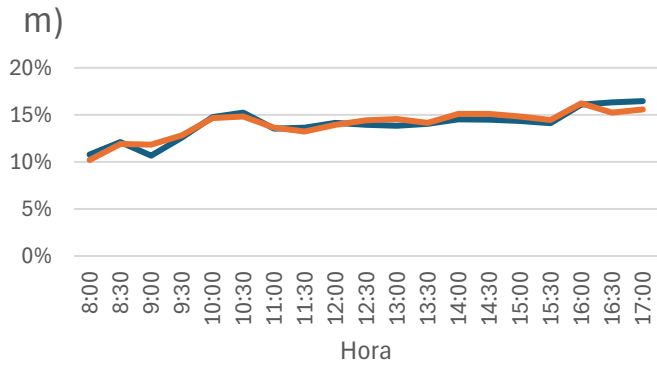
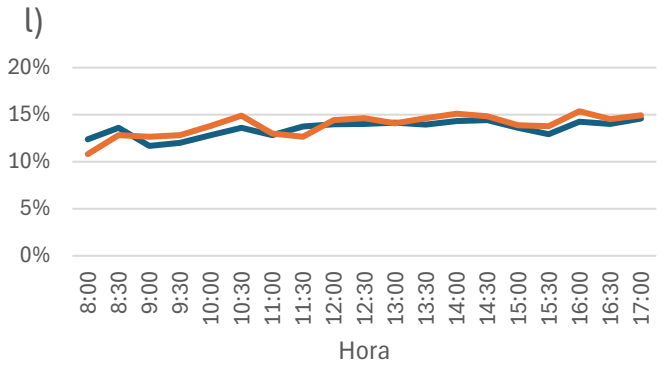
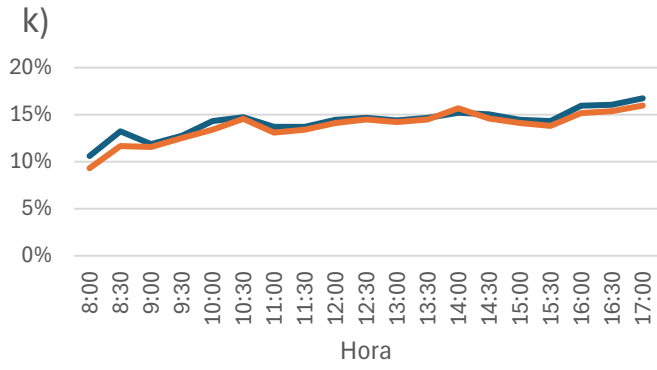
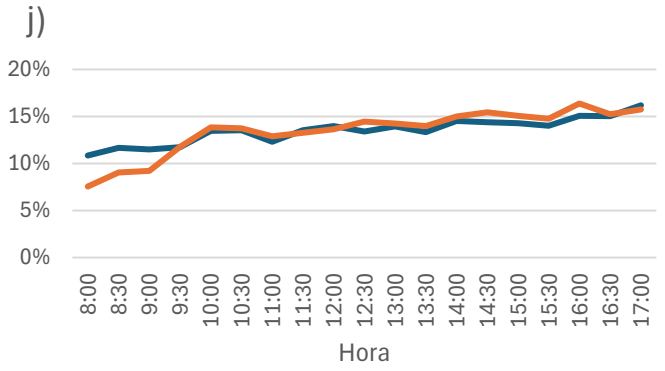
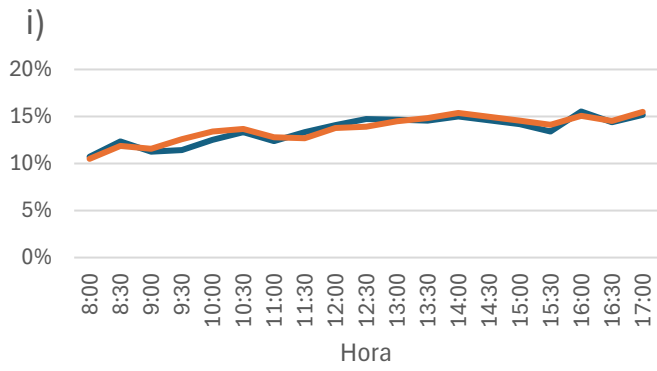
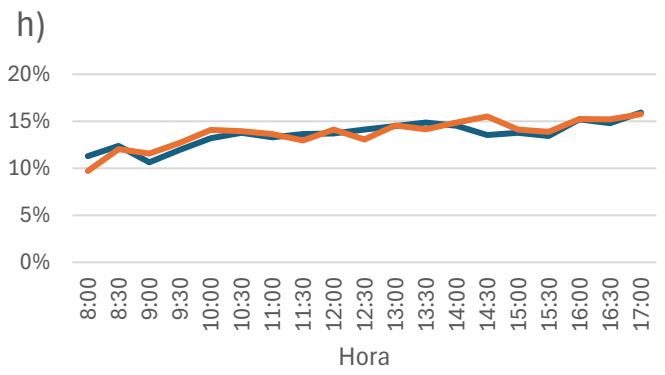
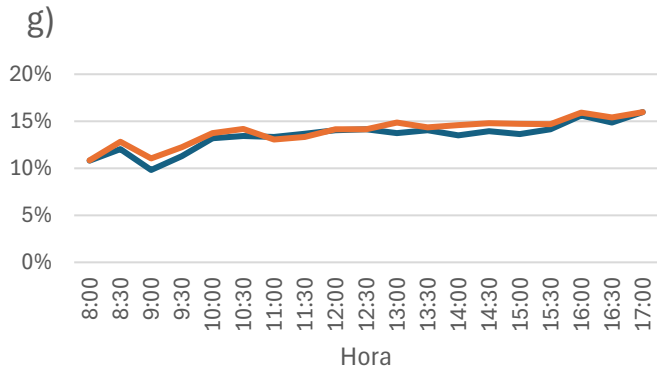




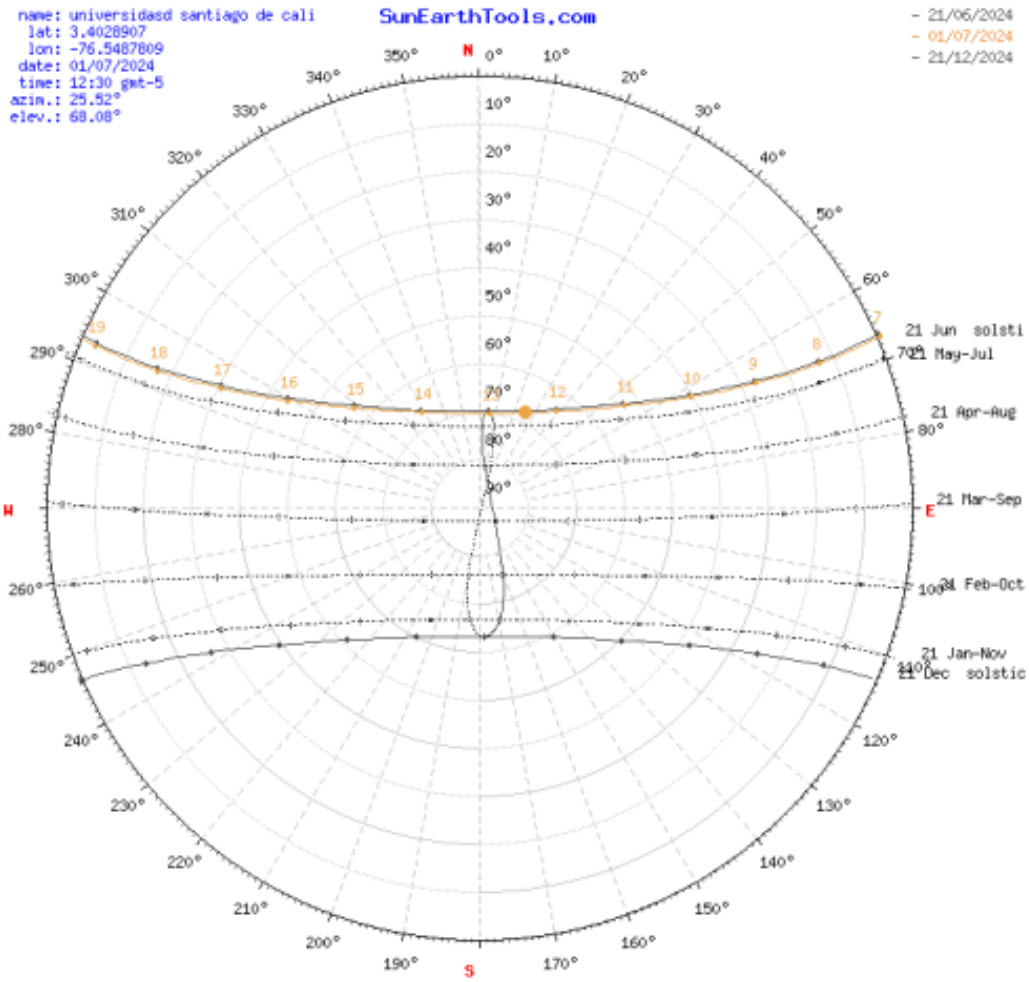
ANEXO 9. GRAFICAS EFICIENCIA PANEL CON SEGUIDOR VS ESTÁTICO PARA EL RESTO DE LOS DÍAS.

— Seguidor
— Estático





ANEXO 10. CARTA SOLAR DEL LUGAR DONDE SE UBICÓ EL PROTOTIPO.



Fuente: SunEarthTools.