



**Estudio de la Eficiencia de un Sistema Solar con Seguidor Solar en Dos Ejes**

Alejandra Álvarez Amaya

Trabajo de grado presentado para optar al título Ingeniera Eléctrica

Asesor

Edwin García Quintero, Doctor (PhD) en Ingeniería

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería  
Ingeniería Eléctrica  
Medellín, Antioquia, Colombia  
2025

Cita	Álvarez Amaya [1]
<b>Referencia</b> Estilo IEEE (2020)	[1] Álvarez Amaya, “Archivo fotográfico de la Universidad de Antioquia: valoración histórica de las fotografías, 1997 - 2003”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Eléctrica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2024.



Grupo de Investigación Materiales y Sistemas Energéticos (TESLA)



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## **Dedicatoria**

A mi madre.

## **Agradecimientos**

Agradezco a la Universidad de Antioquia con sus puertas abiertas para el disfrute del aprendizaje, por sus espacios de ocio y de ciencia, deconstrucción, y cimentación de nuevos saberes, lugar donde he podido entablar maravillosos vínculos afectivos que hoy me cobijan y resguardan, por ser un entorno donde me he permitido explorar mi curiosidad, abrirme al diálogo y la construcción continua de nuevas realidades.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	8
ABSTRACT	9
I. INTRODUCCIÓN	10
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
III. JUSTIFICACIÓN	12
IV. OBJETIVOS	13
A. Objetivo general	13
B. Objetivos específicos	13
V. HIPÓTESIS	14
VI. MARCO TEÓRICO	15
VIII. RESULTADOS	23
IX. DISCUSIÓN	33
X. CONCLUSIONES	34
REFERENCIAS	36
ANEXOS	37

## LISTA DE TABLAS

TABLA I: CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS PANELES

TABLA II: CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LAS BATERIAS

## LISTA DE FIGURAS

- Fig. 1.** Eficiencia de los seguidores solares reportados en el mundo
- Fig. 2.** Seguidores solares de 1 eje y 2 ejes
- Fig. 3.** Ubicación de los sistemas solares. Tomado de: Google Earth 2024
- Fig. 4.** Coordenadas de localización SSS y DAST
- Fig. 5.** Angulo optimo
- Fig. 6.** Paneles Solares estructura fija, SSS
- Fig. 7.** Paneles solares Seguidor solar a doble eje, DAST
- Fig. 8.** Diagrama unifilar y ubicación de los equipos de medida SSS vs DAST
- Fig. 9.** Montaje real de SSS vs DAST
- Fig. 10.** Potencias DAST y SSS frente a la irradiación promedio horaria
- Fig. 11.** Eficiencia solar ajustada al consumo: DAST frente al SSS

## **SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS**

<b>HSP</b>	Hora Solares Pico
<b>DAST</b>	Doble Axis Solar Tracking
<b>SSS</b>	Static Solar System
<b>DC</b>	Corriente Directa
<b>V</b>	Voltaje
<b>A</b>	Amperios
<b>E</b>	Potencia
<b>J</b>	Energía
$\eta$	Eficiencia
<b>UdeA</b>	Universidad de Antioquia
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>PhD</b>	Philosophie Doctor

---

## RESUMEN

Este estudio se centra en la evaluación de la eficiencia de los sistemas solares fotovoltaicos con seguidor solar a dos ejes en Colombia, una nación que ha experimentado un crecimiento significativo en la adopción de energía solar debido a su compromiso con los tratados internacionales de descarbonización y reducción de la huella de carbono. A diferencia de investigaciones anteriores que se han enfocado en sistemas fijos o con seguidores de un eje, este trabajo busca llenar un vacío al explorar la viabilidad y rendimiento de los sistemas solares con seguidor solar a dos ejes en el contexto colombiano.

***Palabras clave* — Energía solar, sistemas fotovoltaicos, seguidor solar a dos ejes, eficiencia, descarbonización, matriz energética, Colombia.**



---

## ABSTRACT

This study focuses on evaluating the efficiency of two-axis tracker solar PV systems in Colombia, a nation that has experienced significant growth in the adoption of solar energy due to its commitment to international decarbonization and carbon footprint reduction treaties. Unlike previous research that has focused on fixed or single-axis tracker systems, this paper seeks to fill a gap by exploring the feasibility and performance of two-axis tracker solar systems in the Colombian context.

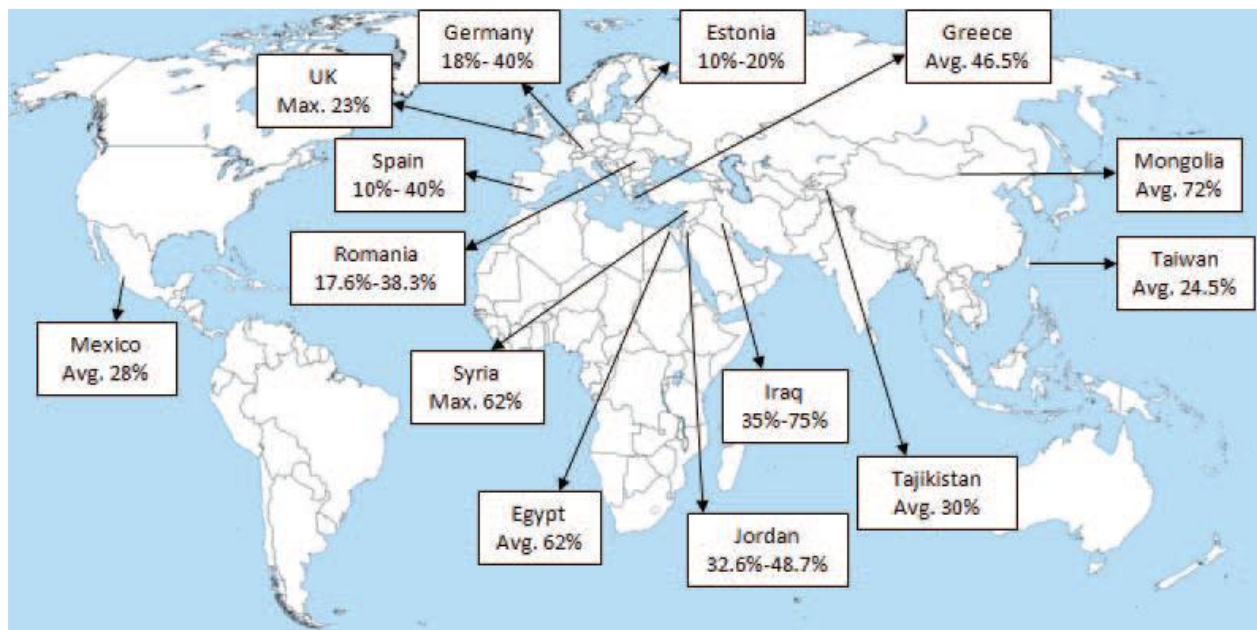
**Keywords** — Solar energy, photovoltaic systems, two-axis solar tracker, efficiency, decarbonization, energy matrix, Colombia.

## I. INTRODUCCIÓN

La energía solar fotovoltaica se presenta como una alternativa clave para la transición hacia una matriz energética más sostenible en Colombia. La adopción de sistemas solares con seguidor de dos ejes sobresale como una opción estratégica para maximizar la eficiencia en la captación de irradiación solar. Este estudio busca llenar un vacío en la investigación nacional al explorar y medir la eficiencia de dicha tecnología, ofreciendo datos valiosos para la toma de decisiones en el desarrollo y planificación de proyectos solares a gran escala.

## II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En algunos países se han desarrollado estudios donde se comparan diferentes tipos de instalaciones y conexiones, posicionamiento y estructuras con el fin de obtener datos y tomar decisiones acerca de qué tipo de conexión es más óptima. El siguiente estudio pretende entonces hacer una comparación entre dos tipos de sistemas, Seguidor Solar o DAST versus Sistema fijo SSS en condiciones ambiental de Medellín, Colombia, con el objetivo de obtener información y tomar decisiones que ayuden a maximizar la obtención de energía por medio del recurso solar.



**Fig. 1.** Eficiencia de los seguidores solares reportados en el mundo

---

### III. JUSTIFICACIÓN

En el contexto energético global actual surgen varias sendas enfocadas a la mitigación, y transformación de la matriz energética, de modo que, la generación de electricidad provenga de fuentes sustentables. En este sentido la energía solar fotovoltaica representa una valiosa alternativa debido a su disponibilidad y sustentabilidad. Sin embargo, la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos puede variar significativamente en función de diversos factores, como lo son la localización geográfica, condiciones ambientales de la región, época del año, y tecnologías usadas en la captación y transformación de la energía como placas fotovoltaicas, y estructuras fijas o móviles.

Medellín debido a su localización geográfica, y las condiciones climáticas tropicales de la región aparece como un potencial escenario de estudio de la eficiencia de los sistemas solares con distintos tipos de tecnología estructural, es decir, Móviles (Doble eje) y fijos. También conocidos como Static Solar System (SSS) y Dual Axis Solar Tracking (DAST). La implementación de sistemas con seguidores solares permite optimizar la captación de irradiancia solar durante el día, permitiendo ajustar la posición de las placas fotovoltaicas para diferentes horas del día y épocas del año en tiempo real, lo que podría representar una mejora en la generación de energía. No obstante, es conveniente cuantificar y analizar información concreta con el fin de justificar su implementación a gran escala.

Este estudio busca llenar el vacío de información existente sobre la eficiencia comparativa de los sistemas solares fotovoltaicos con y sin seguidores solares en Colombia, y específicamente en Medellín. Es fundamental ejecutar actividades que permitan disponer de nuevas instalaciones y acondicionar instalaciones existentes para realizar mediciones de distintas variables eléctricas y adquirir datos empíricos valiosos, además de la obtención de datos meteorológicos que permitan un análisis más completo y contextualizado.

Los resultados obtenidos tendrán implicaciones tanto teóricas como prácticas para la planificación y el desarrollo de proyectos de energía sustentable en Colombia.

## IV. OBJETIVOS

### *A. Objetivo general*

Medir la eficiencia de un sistema solar con seguidor solar en dos ejes en condiciones ambientales de Medellín.

### *B. Objetivos específicos*

1. Revisar el estado del arte sobre la eficiencia de la generación fotovoltaica en Colombia con seguidores solares y sin ellos.
2. Diseñar el sistema de medidas.
3. Ajustar la instalación solar fotovoltaica existente.
4. Realizar las medidas de las variables eléctricas.
5. Obtener las variables meteorológicas por medio de sistemas de información meteorológicos públicos: IDEAM, SIATA otros.
6. Procesar los datos obtenidos.
7. Desarrollar y presentar informe final.

---

## V. HIPÓTESIS

Los sistemas fotovoltaicos con seguimiento solar a doble eje (DAST) presentan una mejora significativa en la eficiencia energética respecto a los sistemas solares fijos (SSS). Esta mejora en eficiencia se refleja en un aumento de la captación de irradiancia solar, lo que permite una mayor generación de energía eléctrica a lo largo del día. Se considera que los paneles en el sistema DAST optimizan su producción de energía debido a su capacidad para mantenerse orientados hacia el sol en todo momento, ajustando su posición a lo largo del día en función de la irradiancia solar.

### **Hipótesis nula**

La instalación de sistemas solares con seguimiento a doble eje DAST no mejora significativamente la eficiencia de la generación fotovoltaica en comparación con los sistemas solares fijos SSS. Bajo condiciones geográficas y ambientales de Medellín la diferencia en la captación de irradiancia solar y generación eléctrica es intrascendente. Además, los costos económicos y energéticos superan los beneficios, dado que el diseño del sistema DAST requiere mantenimiento regular y consumo continuo de energía para operar su mecanismo de seguimiento.

### **Hipótesis alterna**

Existe una diferencia en la eficiencia de los sistemas solares con seguimiento a doble eje DAST, los cuales presentan una mayor captación de irradiancia solar y, por lo tanto, una mayor generación de energía eléctrica en comparación con los sistemas solares fijos SSS, bajo las condiciones ambientales de Medellín. Sin embargo, esta mejora no es especialmente significativa entre sistemas, quedando sujeta a factores específicos como la posición geográfica, las condiciones ambientales, análisis de sombras y ángulos óptimos, así como el costo ecológico y económico de implementación y operación. Estos aspectos influyen directamente en la viabilidad y el impacto del sistema en distintas regiones del país.

---

## VI. MARCO TEÓRICO

La energía es una propiedad o capacidad que tienen los sistemas físicos para realizar trabajo o producir cambios. Es una medida de la capacidad que tiene un objeto o sistema para realizar actividades, transformaciones o ejercer fuerza sobre otros objetos [1]. La energía solar pertenece principalmente a dos formas de energía: la energía radiante y la energía térmica.

### **Energía radiante**

La energía solar se transmite en forma de radiación electromagnética, principalmente en forma de luz visible y radiación infrarroja. Esta radiación viaja desde el sol hasta la Tierra en forma de ondas electromagnéticas y es capturada por los paneles solares fotovoltaicos. Los paneles solares contienen células fotovoltaicas que convierten directamente la energía radiante en energía eléctrica utilizando el efecto fotovoltaico.

### **Energía térmica**

Además de la energía radiante, la radiación solar también transporta energía térmica. Cuando la radiación solar llega a la Tierra, puede ser absorbida por materiales, como paneles solares térmicos o sistemas de calentamiento solar de agua. Estos dispositivos utilizan la energía térmica para calentar fluidos, como agua o aire, que luego se pueden utilizar para diversos fines, como calefacción o agua caliente sanitaria.

Ambas formas de energía, radiante y térmica, son aprovechadas para generar electricidad o calor mediante la utilización de tecnologías solares adecuadas. La energía solar es una fuente de energía renovable y limpia, ya que no produce emisiones de gases de efecto invernadero ni contamina el medio ambiente durante su generación.

### **Energía Solar Fotovoltaica**

La energía solar es una forma de energía que se obtiene a partir de la radiación del sol. Es una fuente de energía renovable y limpia, ya que no produce emisiones de gases de efecto invernadero ni contaminantes durante su generación. La energía solar es abundante y está disponible de forma **gratuita**.

La energía solar fotovoltaica, por otro lado, es una tecnología específica para convertir la energía solar en electricidad utilizando paneles solares fotovoltaicos. Estos paneles están compuestos por células solares, generalmente fabricadas de silicio, que absorben la radiación solar y la convierten directamente en electricidad a través del efecto fotovoltaico.

El efecto fotovoltaico se basa en la propiedad de ciertos materiales semiconductores, como el silicio, de generar una corriente eléctrica cuando se exponen a la luz solar. Cuando los fotones de la luz solar inciden sobre las células solares, los electrones del material semiconductor se liberan y generan una corriente eléctrica. Esta corriente eléctrica, en forma de corriente continua (CC), se puede utilizar directamente para alimentar dispositivos eléctricos o se puede convertir en corriente alterna (CA) mediante el uso de inversores, para su uso en los hogares o para inyectarla en la red eléctrica.

### **Energía solar fotovoltaica en Colombia**

Las primeras aplicaciones térmicas datan de mediados del siglo pasado, cuando se instalaron calentadores solares en diferentes universidades del país para estudios de comportamiento. Posteriormente, en los años setenta, instituciones universitarias y fundaciones sentaron las bases para la instalación de calentadores solares domésticos y sistemas de calentamiento de agua en centros comunitarios.

La generación de electricidad con energía solar mediante sistemas fotovoltaicos ha sido principalmente dirigida al sector rural en Colombia. Esto se debe a que los altos costos de generación y mantenimiento en zonas remotas hacen que la generación solar sea más económica y confiable a largo plazo. Desde los años 80, se han instalado pequeños generadores fotovoltaicos para telecomunicaciones rurales, y posteriormente se implementaron sistemas más grandes para antenas satelitales y otras aplicaciones [1].



---

## **Normativa Solar en Colombia**

En Colombia existe la ley 1715, titulada "Por medio de la cual se reglamenta la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional", es una legislación clave que busca promover el desarrollo y uso de fuentes de energía renovable en el país [2].

### **Ley 1715**

El objetivo de esta ley es impulsar el desarrollo y uso de fuentes de energía no convencionales, especialmente las renovables, en el sistema energético nacional de manera integrada. También busca promover su utilización en zonas no interconectadas, servicios públicos domiciliarios, alumbrado público y otros usos energéticos, con el fin de lograr un desarrollo económico sostenible, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y garantizar un suministro energético seguro. Además, se busca fomentar la gestión eficiente de la energía y la implementación de sistemas de medición inteligente, que incluyen tanto la eficiencia energética como la respuesta a la demanda [2].

### **Huella de carbono-Emisiones**

Las emisiones de combustibles fósiles. En comparación con otras fuentes de energía, como el carbón y el gas natural, la energía solar tiene una huella de carbono significativamente más baja. Según [3], cada kilovatio-hora (kWh) de electricidad generada por energía solar tiene una huella de carbono equivalente a 6 gramos de CO<sub>2</sub>, mientras que el carbón emite en promedio 109 gramos de CO<sub>2</sub> por kWh y el gas natural emite alrededor de 78 gramos de CO<sub>2</sub> por kWh Incluso en comparación con otras fuentes renovables, como la energía hidroeléctrica y la bioenergía, la energía solar tiene una huella de carbono más baja.

La energía solar también es una de las fuentes de energía más baratas en términos de producción e instalación. Según datos de la Asociación Internacional de la Energía (IEA), en 2021 la energía solar generó más de 994 Tera vatios-hora (TWh) en todo el mundo. Además, se proyecta que la capacidad de generación de electricidad renovable aumentará en los próximos años, y se espera que la energía solar represente el 60% de este crecimiento [4].

### Tipos de seguidores solares

Existen dos tipos de seguidores solares: los de un eje y los de dos ejes. Los seguidores solares de un eje se orientan en dirección norte-sur, sur-norte y permiten el movimiento en dirección este-oeste, siguiendo el recorrido del sol desde su salida hasta su puesta. Estos sistemas son más simples y mejoran el rendimiento de captación solar en un rango de 25% a 30%.

Por otro lado, los seguidores solares de dos ejes tienen una orientación en dos direcciones: un eje alineado en dirección norte-sur y otro alineado en dirección este-oeste. Estos sistemas están diseñados principalmente para maximizar la producción de energía durante todo el año. La orientación norte-sur varía según las estaciones del año, pero el seguimiento del sol en dirección este-oeste se mantiene constante. Los seguidores solares de dos ejes mejoran el rendimiento de captación solar en un rango del 5% al 10% [5].

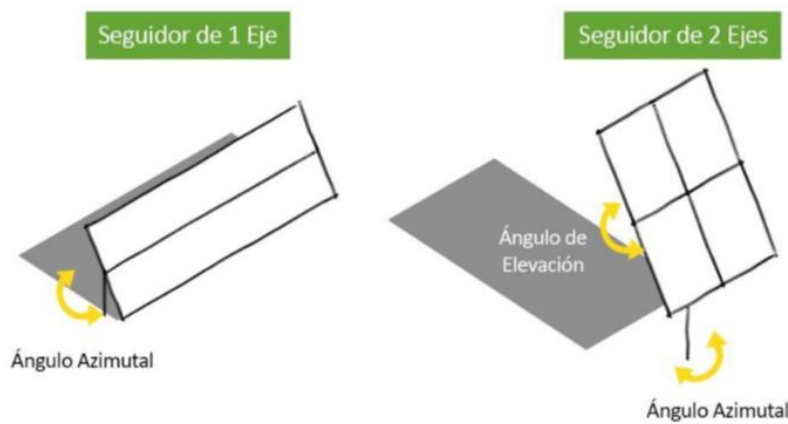


Fig. 2. Seguidores solares de 1 eje y 2 ejes

### Eficiencia en paneles solares con estructura fija, a un eje, y doble eje.

La captación de energía solar utilizando paneles solares con seguidores solares de un eje supera significativamente a la captación de energía de los paneles solares fijos. Los picos máximos de producción alcanzan los 128,52 watts en el caso de los paneles con seguidor solar, mientras que los paneles fijos registran picos máximos de 94,08 watts. En cuanto a los valores mínimos, los paneles con seguidor solar tienen un rendimiento mínimo de 21,12 watts, mientras que los paneles

---

fijos llegan a un mínimo de 11,94 watts. Estos resultados destacan la ventaja de utilizar seguidores solares para maximizar la captación de energía solar [6].

En la evaluación del rendimiento para dos tipos de sistemas de captación de energía solar se encontró que el sistema solar de doble eje (DAST por sus siglas en inglés) es capaz de seguir la posición bidimensional del sol, manteniendo un ángulo mínimo entre los rayos solares y los paneles fotovoltaicos, lo que garantiza una máxima absorción de la luz solar, independientemente del clima.

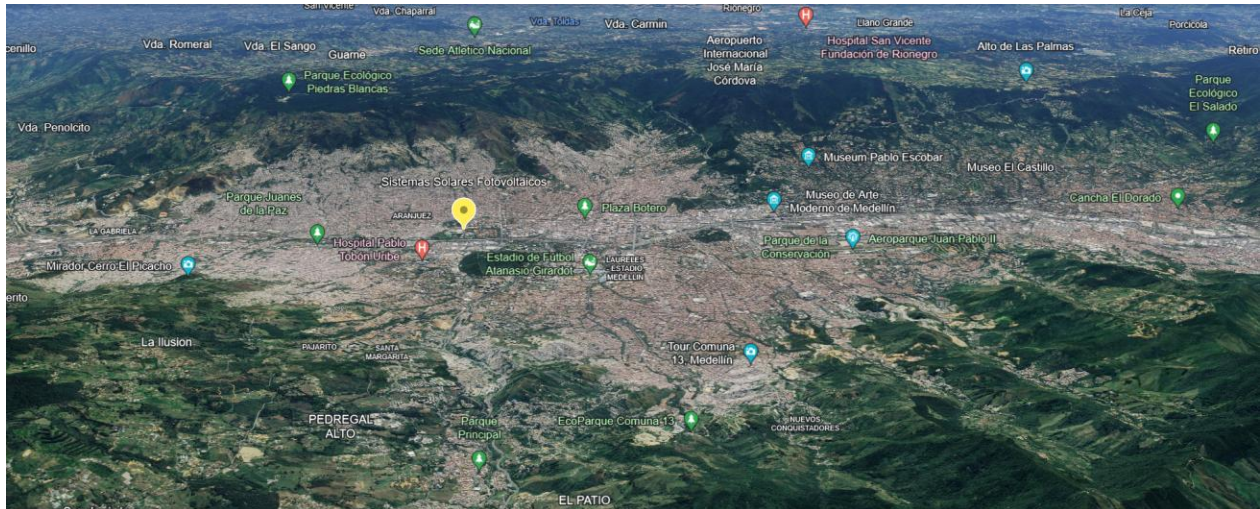
Los resultados del estudio muestran que DAST produce 217,95Wh de energía en un día soleado, con una eficiencia del 89,14%, y 8,622Wh en un día nublado, con una eficiencia del 35,78%. Durante todo el mes de agosto, la eficiencia de DAST fue del 86,52%, casi el doble de la eficiencia de los sistemas solares estáticos (SSS, por sus siglas en inglés) en las mismas condiciones [7].

### **Tipo de conexión según el interés del estudio**

A la hora de instalar paneles solares es importante tener en cuenta el esquema de **Instalación** (Red, Híbrido, Aislado) y el esquema de **conexión** de las placas solares (Serie, Paralelo, Serie-Paralelo). El tipo de conexión se elige según el interés, es decir, si se quiere obtener mayor voltaje es conveniente una conexión tipo serie, mientras que, si el objetivo es obtener mayor corriente, la conexión más adecuada sería paralela, la conexión serie-paralela se deja para aquellas conexiones donde se requiere tener tanto un aumento en el voltaje, como un aumento en la corriente, esta última conexión es comúnmente utilizada para viviendas e instalaciones comerciales.

### **Ubicación de los sistemas Solares Fotovoltaicos**

Los sistemas fotovoltaicos están ubicados en la zona céntrica de Medellín, específicamente en la parte norte del campus ciudadela de la Universidad de Antioquia y al lado del Estadio cincuentenario.



**Fig. 3.** Ubicación de los sistemas solares. Tomado de: Google Earth 2024

### **Angulo óptimo de inclinación**

Es el ángulo en el que los paneles solares maximizan la captación de radiación solar a lo largo del año y sacarle el mayor partido a la instalación. Este ángulo varía según la ubicación geográfica del sistema y la aplicación específica, pero generalmente está cerca de la latitud del lugar. Al ajustar la inclinación de los paneles solares para que estén más cerca del ángulo óptimo, se puede mejorar la eficiencia del sistema al aumentar la cantidad de radiación solar capturada durante todo el año. Sin embargo, en aplicaciones específicas, como sistemas fotovoltaicos montados en tejados residenciales, la inclinación puede ser ajustada para optimizar la producción de energía durante ciertas estaciones o momentos del día [8]. En su libro "Conceptos básicos de la energía solar fotovoltaica", Sean White proporciona una ecuación para calcular el ángulo óptimo de inclinación de los paneles solares:

$$\beta_{opt} = 3,7 + 0,69 |\varphi| \quad (14)$$

Donde:  $\beta_{opt}$  es Inclinación óptima para maximizar la captación de energía anual en grados sexagesimales y  $\varphi$  es la latitud del lugar en grados sexagesimales [9].

### **Eficiencia en sistemas solares**

La eficiencia representa de manera cuantitativa en que porcentaje un sistema es más o menos eficiente en comparación con otro, se utilizan las siguientes fórmulas para el estudio.

---

$$\eta_{\frac{DAST}{SSS}} = \frac{\text{Potencia generada DAST} - \text{Potencia generada SSS}}{\text{Potencia generada SSS}} \quad (1)$$

La fórmula 1, hace referencia a la eficiencia del DAST con respecto al SSS sin tener en cuenta el consumo del DAST para su propio funcionamiento

$$\eta_{DAST} = \frac{\text{Potencia consumida DAST}}{\text{Potencia generada DAST}} \quad (2)$$

La fórmula 2, Habla de cuan eficiente es el sistema respecto a su propio consumo

$$\eta_{\frac{DAST}{SSS}_c} = \eta_{\frac{DAST}{SSS}} - \eta_{DAST} \quad (3)$$

Finalmente la fórmula 3, refleja que tan eficiente es el sistema DAST comparado con el SSS, teniendo en cuenta el consumo energético del DAST para su propio funcionamiento.

---

## VII. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en este estudio de eficiencia de sistemas DAST se basa en una serie de actividades. Incluye la selección y caracterización de los paneles solares, el diseño e instalación del sistema experimental, el monitoreo y recolección de datos, y el análisis y evaluación de los resultados. Esta metodología permitirá obtener información precisa y detallada sobre el rendimiento y la eficiencia de estos paneles solares.

**Actividad 1.** Definición de los aspectos y parámetros a medir, con el fin de obtener con cierta exactitud la eficiencia de los paneles con estructura de doble eje.

**Actividad 2.** Selección de los paneles solares. Se recopilarán datos técnicos, especificaciones y características relevantes de los paneles seleccionados, como potencia nominal, eficiencia de conversión, área superficial.

**Actividad 3.** Diseño experimental. Determinación de algunos parámetros que se puedan incluir en la toma de datos, intensidad, temperatura, orientación de la estructura y el panel.

**Actividad 4.** Montaje de los paneles solares. Instalación sobre la estructura en configuración de seguimiento bidimensional, para que se pueda mover en dos ejes.

**Actividad 5.** Medición y recopilación de datos. Utilización de los equipos de medición adecuados para recopilar los datos asociados a la eficiencia de los paneles en diferentes momentos del día, y bajo diferentes condiciones climáticas.

**Actividad 6.** Análisis de datos. Procesamiento y análisis de los datos recopilados. Cálculo de la eficiencia de conversión para cada conjunto de datos y comparación en función de los diferentes ángulos de seguimiento en los dos ejes. Realización de gráficas y tablas para visualizar los resultados.

**Actividad 7.** Evaluación de los resultados obtenidos y obtención de las conclusiones basadas en el análisis de datos. Comparación de la eficiencia de los paneles solares en diferentes configuraciones y análisis de las variables que puedan haber influido en los resultados.

**Actividad 8.** Informe final. Documentación de todos los pasos realizados, datos recopilados, análisis realizados y conclusiones obtenidas en un informe final.

## VIII. RESULTADOS

### Definición de los parámetros a medir

Durante esta actividad, se definieron algunos parámetros esenciales para calcular la eficiencia de los paneles solares en las diferentes configuraciones Seguidor solar a doble eje (DAST) y Sistema Fijo (SSS)

- Voltaje (V [Voltios]),
- Corriente (I [Amperios]),
- Potencia (P [kWh] kilovatio hora),
- Energía (J (Julios)), y el
- Cálculo de la eficiencia energética  $\mu$ .

El cálculo de la eficiencia energética se basará en la relación entre la energía generada por los sistemas para diferentes horas del día.

### Selección de los paneles

Se seleccionaron paneles solares con las mismas características técnicas para ambos sistemas con el fin garantizar una comparación precisa.

TABLA I  
CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS PANELES

Característica	Unidad	
Potencia máxima	W	320
Tolerancia	%	0+ 3
Potencia de corriente máxima	A	8.63
Potencia de voltaje máxima	V	37.1
Área superficial	mm	1360*992*40

En vez de realizar una diferenciación atribuida a las diferentes configuraciones, la selección adecuada de los paneles ayuda a orientar los análisis a factores ambientales, costos económicos, y beneficios energéticos,

### Diseño Experimental y Determinación de parámetros

El diseño experimental incluyó la determinación de varios parámetros clave que influirían en la eficiencia de los sistemas:

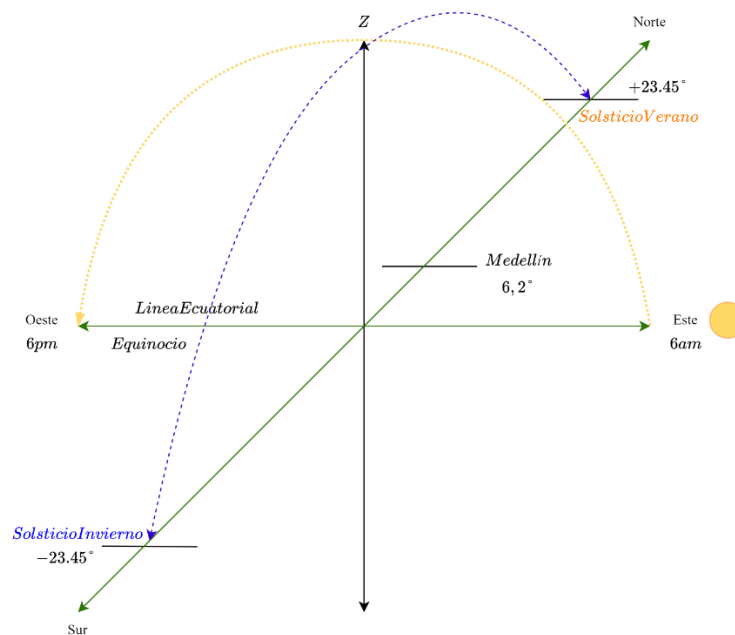
Temperatura: Se toman los datos de la temperatura de la ciudad con datos descargados de plataformas como el SIATA, IDEAM, y aplicaciones del tiempo como AccuWeather.

## Ángulo Óptimo de Inclinación y Orientación

Orientación de la Estructura y Paneles: Se calculó el **ángulo óptimo de captación de radiación** para maximizar la eficiencia del sistema fijo durante noviembre.



**Fig. 4.** Coordenadas de localización SSS y DAST



**Fig. 5.** Angulo optimo

El ángulo óptimo de inclinación para la ciudad de Medellín es de  $8.0091^\circ$ , Donde para los meses de abril a agosto se propone una Orientación **Norte**, Mientras que para los meses de septiembre a marzo se recomienda una orientación **Sur**



### Montaje de los paneles solares

El montaje de los paneles se realizó de acuerdo con el diseño experimental. Para ambos sistemas SSS y DAST, se conectaron los paneles a través de un inversor y una batería, y se configuraron en la misma conexión tipo red. Se utilizó un esquema de conexión en serie para igualar la capacidad de voltaje de ambos sistemas (80 V DC).

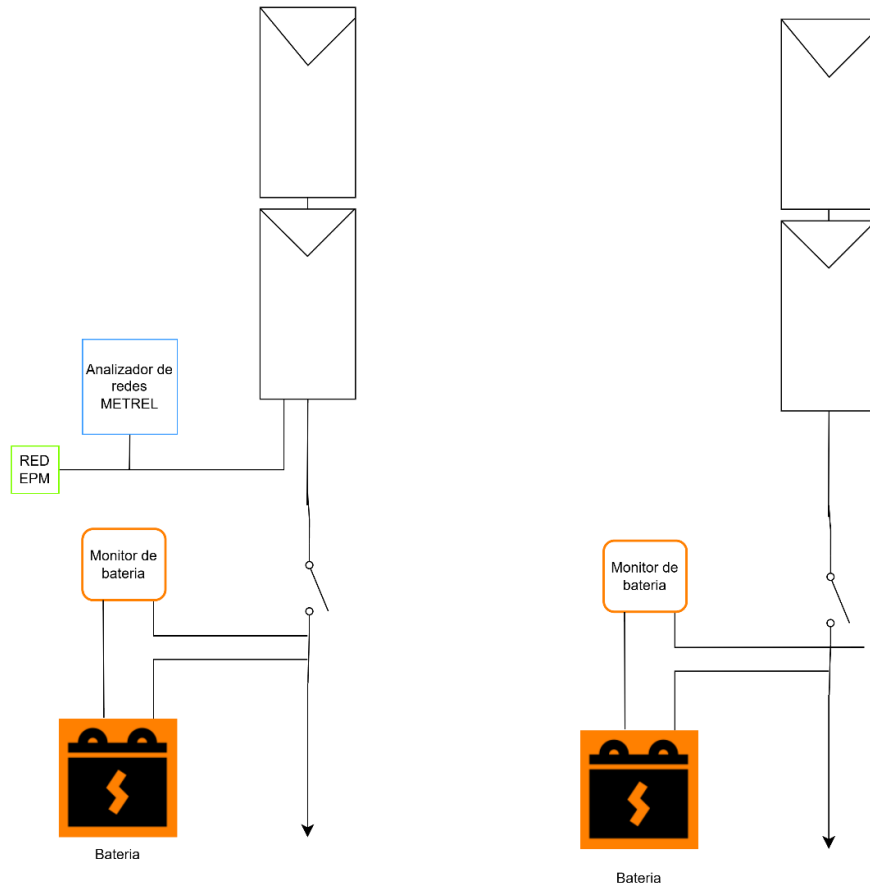
Se hizo uso de analizadores de redes, pinzas amperimétricas, multímetros y monitores de batería, asegurando la captura precisa de datos sobre el rendimiento de cada sistema.



**Fig. 6.** Paneles Solares estructura fija, SSS



Fig. 7. Paneles solares Seguidor solar a doble eje, DAST



**Fig. 8.** Diagrama unifilar y ubicación de los equipos de medida DAST vs SSS



**Fig. 9.** Montaje real de DAST vs SSS

TABLA II  
CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LAS BATERIAS

<b>Baterías mtek 12V 255 (AH GEL)</b>	
Voltaje nominal	12 V
Capacidad	255A/h
Dimensión	L: 522mm W: 238mm H: 218mm TH: 238mm
Peso Aproximado	72 kg / 158.8 libras
Resistencia interna	2.8m ohm aprox.
Taza de descarga	3% por mes a 25 ° Celsius

Los datos en las gráficas subyacentes corresponden a la energía generada por ambos sistemas SSS y DAST para los días 21, 22, 25, 26 y 27 de noviembre del 2024. También se presentan las gráficas que relacionan la eficiencia de los sistemas entre sí, realizando una comparación porcentual de los sistemas en base a la potencia generada en cada instante de tiempo, y a el consumo energético del DAST.

### **Primer día de pruebas**

Las diferencias en la potencia para los dos sistemas solares durante el día 21 de noviembre se muestran en la fig. 1. Nov 21. En la gráfica se muestra que para cada momento del día el sistema DAST supera ligeramente el sistema SSS generando más potencia eléctrica. También se observa que alrededor de la 1:10 PM hubo un pico de potencia en ambos sistemas generando 237.6038 [W] para el DAST y 222 [W] para el SSS, ambas series se comparan con la irradiancia solar promedio horaria.

### **Día parcialmente nublado**

En la ciudad de Medellín el día 22 de noviembre de 2024, fue considerado como un día parcialmente nublado, por tener distintos momentos de nubosidad y claros. En la Fig. 1. Nov 22 de potencia generada para ambos sistemas, se observa una irradiancia solar más intensa para las primeras horas del día alcanzando alrededor de los 447 [W/m<sup>2</sup>] en comparación con las horas de la tarde donde la irradiancia solar no alcanzo los 150 [W/m<sup>2</sup>]. También se observa un momento importante durante las 11:00 AM y 12 PM, donde el DAST fue superior en la captación de energía,

esto debido a sombras proyectadas sobre el SSS en esta época del año y a esa hora en particular. (Anexo). También se observa que a las 1:00 y las 2:00 PM se presentan los picos más altos de potencia siendo 231.60 W y 203.66 W para el DAST y SSS respectivamente.

### **Día parcialmente Soleado**

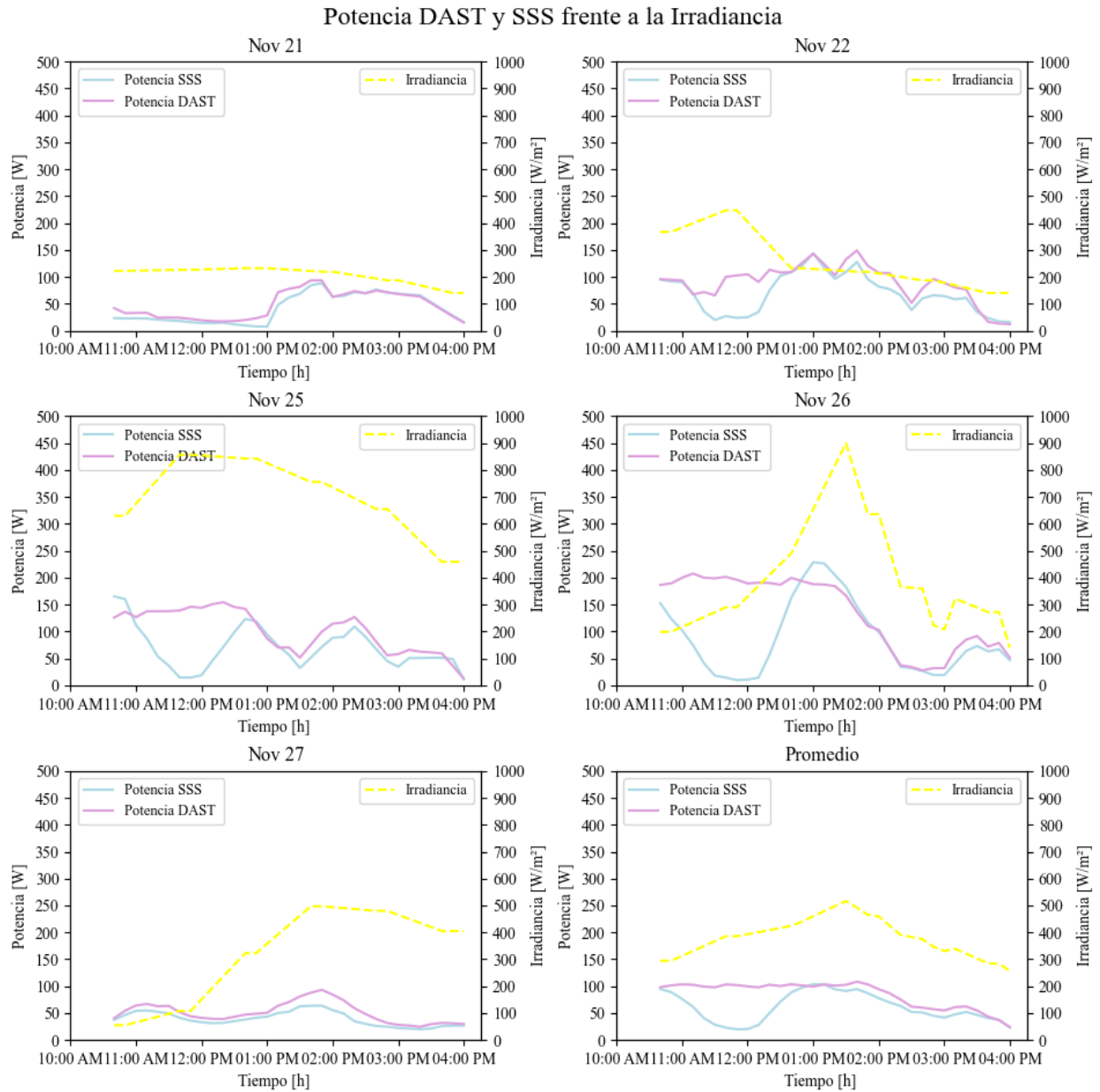
El 25 de noviembre fue un día mayormente soleado donde la irradiancia solar fue sutilmente mayor en las horas de la mañana en comparación a las horas de la tarde, se alcanzaron picos máximos de potencia el rededor de las 10:10 AM con 260.16 W y 169.09 W para el DAST y SSS respectivamente, entre las 11:00 AM y las 12:00 PM se presentan sobras parciales sobre el SSS elevando notablemente la cantidad de energía generada para ese periodo de tiempo por el DAST.

### **Día parcialmente Soleado**

La grafica correspondiente al día 26 de noviembre, para el periodo de tiempo de 11:00AM a 12:00 PM, se observa una diferencia relevante en la captación de energía del DAST en comparación al SSS, donde para esta hora del día se presentan sobras proyectadas sobre el SSS debido a arboles cercanos en la zona. Se observa que la captación de energía alcanza su pico más alto a las 12:40 PM, estando por encima el DAST con 279.79W en comparación al SSS con 250.66 W. También se muestra que para otros momentos del día donde hubo claros y nubes ambos sistemas tienen un comportamiento similar, siendo ligeramente mayor la captación de energía en el DAST.

### **Último día de prueba**

El día 27 de noviembre fue predominantemente nublado en la ciudad de Medellín, donde las primeras horas, es decir, entre las 10:00 AM y las 12:00 PM, la irradiancia solar fue pobre, para otros momentos del día la irradiancia solar aumento ligeramente, alcanzando su pico más alto al redor de la 1:30 PM con hasta 500 W/m<sup>2</sup> y descendiendo levemente hasta los 400 W/m<sup>2</sup> en las horas de la tarde, se muestra en la fig. 1 Nov 27. que ambos sistemas tuvieron un comportamiento similar en la captación de energía, alcanzando una potencia pico de 110.83 W y 97.32 W para el sistema DAST y SSS respectivamente. Además, se observa que para días donde predominan las nubes no hay diferencia notable en la captación de energía en el periodo de tiempo de 11:00 AM a 12:00 PM donde las sombras proyectadas sobre el SSS no representan una perdida significativa de captación de energía.



**Fig. 10.** Potencias DAST y SSS frente a la irradiación promedio horaria

**Promedio**

La fig. 1. Promedio, consolida las potencias generadas y la irradiancia solar para los días de toma de datos, muestra que en promedio la potencia generada por el DAST es levemente superior que la generada por el SSS, se observa que las sombras proyectas entre las 11:00 am y las 12:00 pm sobre el SSS, afecta notablemente la captación de energía, dejando muy por encima la generación en el sistema DAST.

### **Temperatura**

En la información recopilada también se agregó el parámetro de la temperatura, donde para las condiciones ambientales y la zona tropical en la que se encuentra ubicada la ciudad de Medellín, y los sistemas solares, no toma mayor relevancia, manteniendo temperaturas promedio durante el día de 25 °C.

### **Eficiencia**

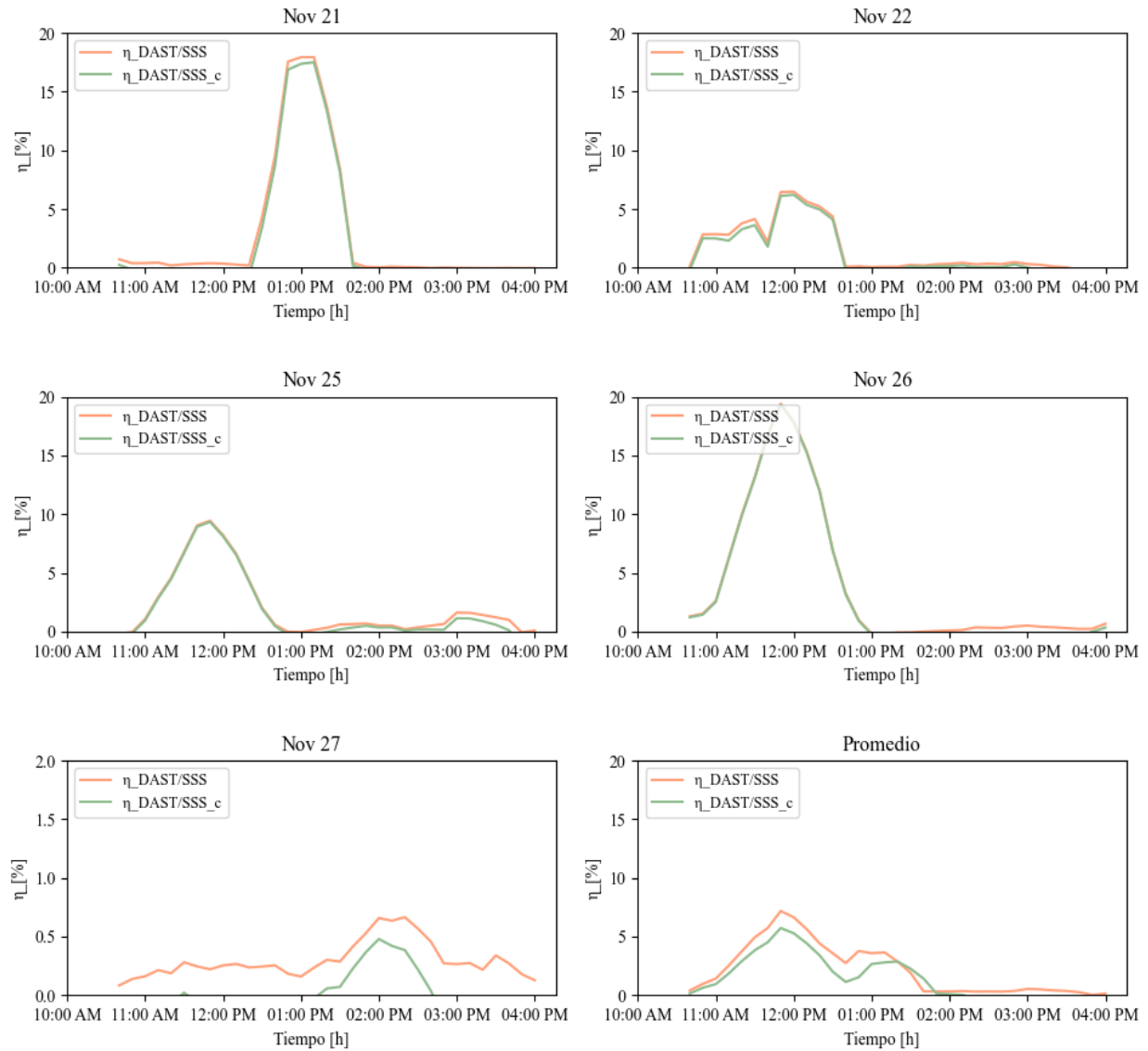
En la fig. 2. Se muestra un gráfico donde se observan 2 métricas diferentes asociadas a la eficiencia, La eficiencia del DAST respecto al SSS sin tener en cuenta el consumo de los servomotores encargados de mover la estructura, y Eficiencia del DAST respecto al SSS teniendo en cuenta el consumo de los servomotores del sistema DAST. Para los días 21, 22, 25,26, y 27 de noviembre del 2024, además en la última grafica (promedios) de la misma figura 2. se muestran las eficiencias promedio para los 5 días.

La línea salmón muestra la eficiencia del DAST en comparación al SSS, y la línea, verde clara, muestra la eficiencia del DAST sobre el SSS teniendo en cuenta el consumo del DAST.

Para todos los días de toma de datos sin tener en cuenta el consumo de los servomotores del DAST, el DAST supero en eficiencia a el SSS, particularmente para el día 26 de noviembre donde la eficiencia del DAST fue mayor en las horas de la mañana en comparación a las horas de la tarde, donde la eficiencia del DAST se vio drásticamente afectada por el consumo en W de sus servomotores y la pobre disponibilidad de irradiancia solar en ese periodo de tiempo, no permitiendo suplir sus necesidades energéticas propias y disminuyendo el beneficio energético asociado al mismo.

El comportamiento de las 2 métricas es variable y depende del día, las condiciones ambientales, la época del año, la geolocalización y posicionamiento de los sistemas. La eficiencia porcentual del DAST frente al SSS es superior, sin embargo, para días nublados el consumo energético del DAST se sobreponen a los beneficios energéticos asociados al mismo.

Eficiencia ( $\eta$ ) Solar Ajustada al Consumo: DAST frente a SSS



**Fig. 11.** Eficiencia solar ajustada al consumo: DAST frente al SSS

Para días nublados el DAST se ve afectado en su eficiencia, ya que, la potencia generada por el mismo no supe las necesidades energéticas (entre 14 y 15 [W]) de los servomotores encargados del movimiento en dos ejes de la estructura.



---

## IX. DISCUSIÓN

Aunque el DAST muestra una ventaja sobre el SSS, las condiciones del tiempo atmosférico nubladas limitan severamente la captación de energía de ambos sistemas, no permitiendo alcanzar un rendimiento óptimo y, por ende, presentando bajos niveles de energía total generada durante el día. Durante estos días de mayor nubosidad el DAST pierde relevancia con un impacto menor en la captación, pero su capacidad de aprovechar mejor los intervalos de mayor irradiancia sigue siendo notable.

Se consideró la localización geográfica de la ciudad y la época del año, lo que permitió determinar la orientación y ángulo óptimo de posicionamiento para el SSS, con el fin de optimizar la captación de energía. El sistema DAST se consideró como una instalación existente cuya configuración está basada en la localización geográfica y programación temporal del movimiento, y la cual toma en cuenta la información del sensor de inclinación para reposicionamiento diario del sistema.

Algunas medidas se vieron afectadas y se podrían ver afectadas en el futuro por sombras proyectadas a ciertas horas del día sobre el SSS y el DAST, debido a que, el lugar de posicionamiento de las estructuras es arbolado y además este sujeto a la sombra proyecta por el viaducto del metro en algunos meses del año. Otras causas que no permitieron una recopilación más aceptable de los datos se basan en la configuración del seguidor solar, donde fallas en la programación del punto de referencia de control temporal no alcanza su límite, y, por ende, no permitiendo un reposicionamiento efectivo de la estructura y no alcanzando puntos máximos de captación de irradiación en todo momento.

Los datos asociados a la irradiancia fueron tomados de bases de datos web, las cuales permiten tomar como punto de referencia la irradiancia promedio horario diaria. La medición de la irradiancia solar se ve afectada debido a la variabilidad de las sombras proyectadas por las nubes, es decir, los datos de irradiancia tomados de piranómetros ubicados en otras partes de la ciudad, no representa precisamente en la misma proporción la irradiancia in situ del lugar de estudio.

---

## X. CONCLUSIONES

Durante el desarrollo de la investigación se observó como las sombras y el movimiento del sol durante el día, interfieren en la captación de la irradiancia, por consiguiente, representa una disminución en los índices de generación de energía eléctrica durante algunos periodos de tiempo.

Para días soleados como el del 26 de noviembre se presenta una sombra entre las 11:00 AM y las 12:00 PM, que disminuye significativamente la captación de energía en el SSS, poniendo muy por encima los porcentajes de eficiencia en el sistema DAST.

Para optimizar la captación de energía en los SSS para diferentes periodos de tiempo es preciso calcular el ángulo óptimo de captación de energía, donde dicho ángulo depende de la época del año y localización de los sistemas.

Las causas de error asociadas a la localización de los sistemas solares se presentan en mayor medida por presencia de árboles e infraestructura alrededor especialmente en el SSS, fallas en la programación del DAST que impidieron un reposicionamiento real del mismo y la falta dispositivos de medida como piranómetros in situ, limitaron la capacidad de los sistemas para alcanzar picos máximos de captación de irradiancia solar en todo momento.

## XI. RECOMENDACIONES

Realización de estudio de sombras que ayude con el posicionamiento óptimo de los sistemas, con el fin de obtener la mayor radiación solar directa posible durante el día.

Para el sistema DAST es conveniente considerar un software que permita el análisis del desempeño operativo, es decir, los cambios de inclinación y posicionamiento en tiempo real, y observación de los cambios de posición solar (velocidad y precisión del seguimiento).

Para ambos sistemas es conveniente la revisión de la instalación, mantenimiento y limpieza continua, al menos 2 veces al año, preferiblemente durante días con pronósticos de radiación solar bajos en tiempos de alta nubosidad.

Adquisición de equipos de medida y monitoreo continuo, tales como, piranómetro, termómetro ambiental, medidores de energía DC, con el fin, de tener una mayor precisión en la toma de datos in situ.

## REFERENCIAS

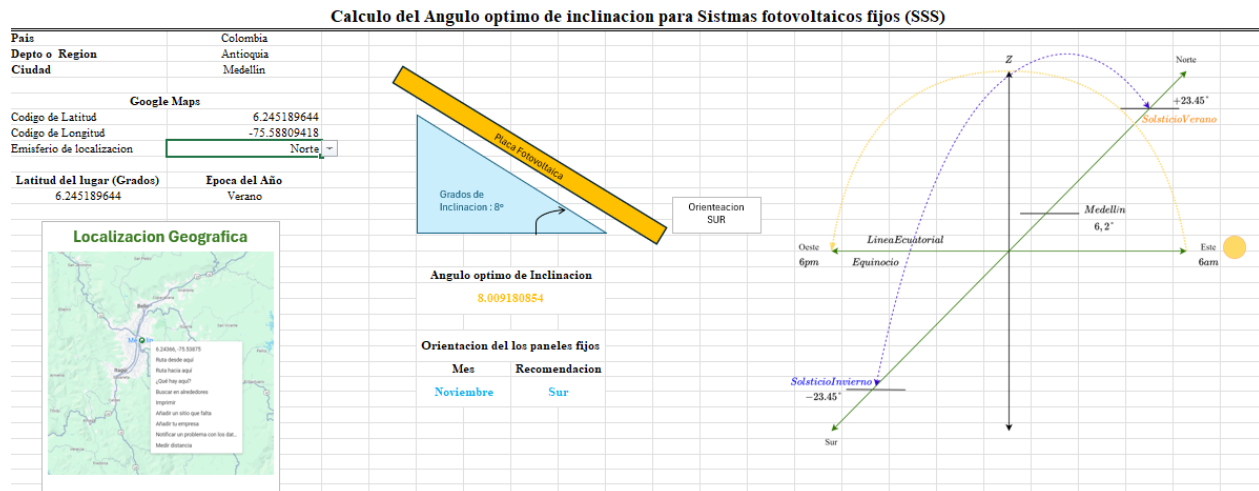
- [1] Rodríguez, H. (15 de 01 de 2009). Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas.
- [2] República de Colombia-Gobierno Nacional. (13 de 05 de 2014). Ley 1715: Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. Bogotá.
- [3] M. Pehl, A. Arvesen, F. Humpenöder, A. Popp, E. G. Hertwich y G. Luderer, "Understanding future emissions from low-carbon power systems by integration of life-cycle assessment and integrated energy modelling", *Nature Energy*, vol. 2, n. ° 12, pp. 939–945, diciembre de 2017. Accedido el 23 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1038/s41560-017-0032-9>
- [4] Redacción National Geographic. "National Geographic". National Geographic. <https://www.nationalgeographic.com/medio-ambiente/2022/04/la-energia-solar-y-su-potencial-para-ayudar-a-reducir-el-calentamiento-global> (accedido el 8 de mayo de 2023).
- [5] C. E. Walteros Waltero, "Diseño de sistema estructural tipo seguidor solar para paneles fotovoltaicos hexagonales dirigida a granja solar, finca el Dinde -La mata, Huila", Trabajo de grado, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., 2020.
- [6] L. F. Daza Carrillo, J. S. Pérez Aselas, "Diseño, construcción e implementación de un sistema de seguimiento solar de un eje en una estación de carga de celulares utilizando paneles solares", trabajo de grado, Universidad Pontificia Bolivariana, Florida Blanca, 2020.
- [7] A. Masih and I. Odinaev, "Performance Comparison of Dual Axis Solar Tracker with Static Solar System in Ural Region of Russia," 2019 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT), Yekaterinburg, Russia, 2019, pp. 375-378, doi: 10.1109/USBREIT.2019.8736642.
- [8] Kokouvi Edem N'Tsoukpoe, "*Effect of orientation and tilt angles of solar collectors on their performance: Analysis of the relevance of general recommendations in the West and Central African*" *Scientific African*, Volume 15, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e01069>.
- [9] S. White, "*Solar Photovoltaic Basics: A Study Guide for the NABCEP Entry Level Exam*" Routledge, 2015. ISBN: 978-0415713351

## ANEXOS

**Anexo.** La imagen proporciona un visual de las sombras proyectadas para el SSS en días solados entre las 11:00 AM y las 12:00 PM, lo que explica que el porcentaje de eficiencia se menor en el mismo.



### Anexo. Cálculo del ángulo de inclinación SSS, para la ciudad de Medellín



Anexo. Archivo en Excel con los datos recopilados y los cálculos realizados.

[Datos\\_parametros\\_y\\_caracteristicas.xlsx](#)