

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**MODELOS DE ENFRIAMIENTO DE CENTRALES  
FOTOVOLTAICAS FLOTANTES: MODELO FÍSICO Y  
EXPERIMENTAL**

**DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y CAMPAÑA DE MEDICIONES DE  
UN PROTOTIPO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO FLOTANTE.**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**JAIME ANDRÉS ESPINOSA JÁCOME**

**[jaime.espinosa02@epn.edu.ec](mailto:jaime.espinosa02@epn.edu.ec)**

**DIRECTOR:**

**Dr. FREDDY ORDÓÑEZ MALLA**

**[freddy.ordonez@epn.edu.ec](mailto:freddy.ordonez@epn.edu.ec)**

**Quito, febrero 2024**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, Jaime Andrés Espinosa Jácome declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

---

**JAIME ANDRÉS ESPINOSA JÁCOME**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Jaime Andrés Espinosa Jácome, bajo mi supervisión.

---

**FREDDY ORDÓÑEZ MALLA**  
**DIRECTOR**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

JAIME ANDRÉS ESPINOSA JÁCOME

FREDDY ORDÓÑEZ MALLA

## **DEDICATORIA**

Este trabajo está dedicado con amor y gratitud a mi querida abuelita, cuyo inmenso impacto en mi vida trasciende cualquier palabra escrita. A lo largo de este viaje académico, tu apoyo incondicional ha sido mi fuente de inspiración y fortaleza.

## **AGRADECIMIENTO**

A mi amada novia, agradezco sinceramente por ser mi guía constante, por inspirarme y apoyarme en cada paso de este camino. Su presencia ha sido la brújula que ha orientado mis esfuerzos hacia el éxito.

A mi querida abuelita, mi eterna fuente de aliento, agradezco su apoyo incondicional. Sus palabras de sabiduría y amor han sido de gran aporte en los momentos más desafiantes.

A mis amigos, cuyo respaldo ha sido invaluable, les agradezco por su amistad y su aliento constante. En cada risa compartida y en cada consejo sincero, encontré fuerza y motivación.

A mi familia, ya que han sido el pilar fundamental de mi existencia, les dedico este logro. Su amor, sacrificio y constante respaldo han sido el cimiento sobre el cual he construido mis sueños.

A cada uno de ustedes, les agradezco de corazón.

Este logro no solo es mío, sino de quienes han sido mi fortaleza. Gracias por compartir este viaje conmigo.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES .....	II
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	III
DEDICATORIA .....	IV
AGRADECIMIENTO .....	V
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	VI
RESUMEN .....	VIII
ABSTRACT .....	IX
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO .....	1
1.1 Objetivo general .....	2
1.2 Objetivos específicos .....	2
1.3 Alcance .....	2
1.4 Marco teórico .....	2
Definiciones .....	2
Introducción .....	3
Panorama mundial de generación eléctrica fotovoltaica .....	3
Generación eléctrica fotovoltaica flotante .....	5
Potencial fotovoltaico en el Ecuador .....	6
Ecuador y la generación fotovoltaica flotante .....	8
2 METODOLOGÍA .....	9
2.1 Definición de variables a estudiar .....	10
2.2 Determinación de equipos .....	10
Sistema fotovoltaico .....	11
Programación de equipos .....	11
Calibración de equipos .....	12
Diseño de conexiones .....	13
2.3 Instalación del sistema .....	14
Diseño de estructura de flotación .....	14
Diseño de cajas de distribución .....	15
Sistema instalado .....	16
2.4 Verificación de datos .....	17
Validación de datos .....	17
Toma de datos .....	17

2.5	Análisis de datos.....	18
	Relaciones de potencia .....	19
	Eficiencia.....	19
	Relaciones varias .....	20
3	RESULTADOS.....	21
3.1	Resultados .....	22
	Potencia .....	22
	Eficiencia.....	24
	Relaciones varias .....	27
	Comparación panel solar flotante - convencional .....	28
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	30
4.1	Conclusiones.....	30
4.2	Recomendaciones .....	31
5	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	32
6	ANEXOS .....	34
	Anexo I. Datos Completos.....	34
	Anexo II. MDT Panel Flotante .....	34
	Anexo III. Código de Análisis de datos .....	34

## RESUMEN

En este documento se expone detalladamente el diseño, recopilación y análisis de una campaña de medición experimental, de variables vinculadas a la generación fotovoltaica a través del uso de un sistema fotovoltaico flotante. La experimentación se desarrolló en el reservorio de Cumbayá, Quito, Ecuador, a lo largo de tres semanas. Se registraron variables ambientales como la temperatura del agua, la temperatura del panel solar y la irradiancia solar. La investigación se centró en analizar la relación entre la eficiencia del panel solar y en factores como la potencia generada, la irradiancia y la temperatura del panel. Los resultados fueron comparados con un sistema convencional en tierra, evidenciando una mejora de la eficiencia del sistema flotante del 2%.

**PALABRAS CLAVE:** paneles fotovoltaicos flotantes, generación fotovoltaica, análisis de datos fotovoltaicos, irradiancia, eficiencia.

## **ABSTRACT**

This document provides a detailed exposition of the design, compilation, and analysis of an experimental measurement campaign concerning variables associated with photovoltaic generation through the utilization of a floating photovoltaic system. The experimentation took place at the Cumbayá reservoir in Quito, Ecuador, over a period of three weeks. Environmental variables such as water temperature, solar panel temperature, and irradiance were recorded. The research focused on analyzing the relationship between the efficiency of the solar panel and factors such as generated power, irradiance, and panel temperature. The results were compared with a conventional ground-mounted system, revealing an enhancement in the efficiency of the floating system by 2%.

**KEYWORDS:** floating photovoltaic panels, photovoltaic generation, photovoltaic data analysis, irradiance, efficiency

# 1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

En 2022, a nivel mundial, la generación eléctrica fue de 29165.10 TWh, donde el 29% provino de fuentes de energía renovable. Dentro de estas fuentes renovables, la generación eléctrica fotovoltaica fue de 1322.60 TWh, equivalentes al 4.53% de generación eléctrica mundial [1]. La generación eléctrica fotovoltaica aprovecha la radiación solar para generar electricidad a través del efecto fotovoltaico.

En el Ecuador, en el mismo año, la producción eléctrica fue de 26900.46 GWh, donde el 86.77% proviene de fuentes renovables. Sin embargo, la generación eléctrica fotovoltaica representó solamente el 0.11% de la generación total [2]. Algunos autores señalan que la producción fotovoltaica en Ecuador tiene un potencial de instalación de 35.70 GWp que podría ser instalados hasta el 2030 para llegar a generar anualmente 61470 GWh [3].

Entre los inconvenientes existentes con las plantas fotovoltaicas se menciona la superficie de terreno necesaria para su instalación y que la eficiencia de un panel solar es relativamente baja (actualmente entre 16.49 y 19.9%) [4]. Adicionalmente, la temperatura impacta significativamente en la eficiencia de los paneles solares, algunos autores sugieren que un descenso de 5 grados en la temperatura del panel puede aumentar desde un 1.5 hasta un 10% de eficiencia [5], [6].

Los sistemas fotovoltaicos flotantes son sistemas instalados sobre embalses, cauces, etc. Estas instalaciones solucionan algunos problemas de las plantas fotovoltaicas terrestres como: la mejora de la eficiencia por el efecto de enfriamiento por agua y el problema del espacio, pues los paneles solares flotantes se superponen al espejo de agua [7], [8].

Esto es importante para ciudades como Quito, capital de Ecuador, donde existen varios embalses de agua para abastecer a la capital y sus alrededores, por ejemplo, el reservorio de Cumbayá, Papallacta, San Pablo y Pisayambo. En estos lugares se vuelve atractiva la instalación de plantas fotovoltaicas flotantes, por su potencial de generación eléctrica fotovoltaica, permitiendo solucionar el problema de la extensión de terreno y mejorando la eficiencia de los paneles solares.

Con el objetivo de realizar diseños más precisos de sistemas fotovoltaicos flotantes, en el país, es necesario el desarrollo de modelos propios de enfriamiento y producción eléctrica de este tipo de sistemas. En este proyecto se pretende desarrollar estos modelos. Para ello el componente propuesto consiste en el diseño, implementación y ejecución de una campaña de mediciones en un prototipo de sistema fotovoltaico flotante instalado en el reservorio de Cumbayá.

## 1.1 Objetivo general

Diseñar, implementar y realizar la campaña de mediciones de un prototipo de sistema fotovoltaico flotante.

## 1.2 Objetivos específicos

- Diseñar e implementar del sistema fotovoltaico convencional y del sistema de registro de datos.
- Recopilar datos de al menos 15 días de producción FV y variables ambientales y meteorológicas.
- Realizar el tratamiento y análisis de los datos obtenidos.

## 1.3 Alcance

En este proyecto se diseñará, implementará y se registrarán los datos de un sistema fotovoltaico flotante ubicado sobre la superficie del reservorio de Cumbayá en Quito, Ecuador. La planificación y configuración de dicho sistema y la recopilación de datos estarán a cargo de los recursos facilitados por la Escuela Politécnica Nacional, que incluyen un panel solar flotante de 100W, un controlador de carga MPPT, una batería de 12V/18Ah, un datalogger Fieldogger Novus, un piranómetro MS-40, dos termopares J, un medidor de temperatura y humedad Switchbot Meter, un sensor de voltaje y un sensor de corriente. El registro de datos se llevará a cabo durante un mes y se medirá el voltaje, la corriente y la temperatura del panel solar flotante, además de mediciones de temperatura y humedad ambiental, temperatura del agua y niveles de radiación solar. No se realizará registro de otras propiedades meteorológicas, ya que se considera que no afectará significativamente en los resultados.

## 1.4 Marco teórico

### Definiciones

**Datalogger:** Equipo eléctrico de toma de datos diseñado para guardar y transformar señales eléctricas en información a través del tiempo.

**Controlador o regulador de carga solar:** Equipo crucial en sistemas fotovoltaicos cuya función principal es regular el flujo eléctrico entre panel solar, batería y carga.

**Piranómetro:** Equipo de medición de alta precisión de la irradiancia.

**Irradiancia:** Medición de la relación entre la potencia en forma de radiación electromagnética y el área de una superficie donde aplica dicha radiación.

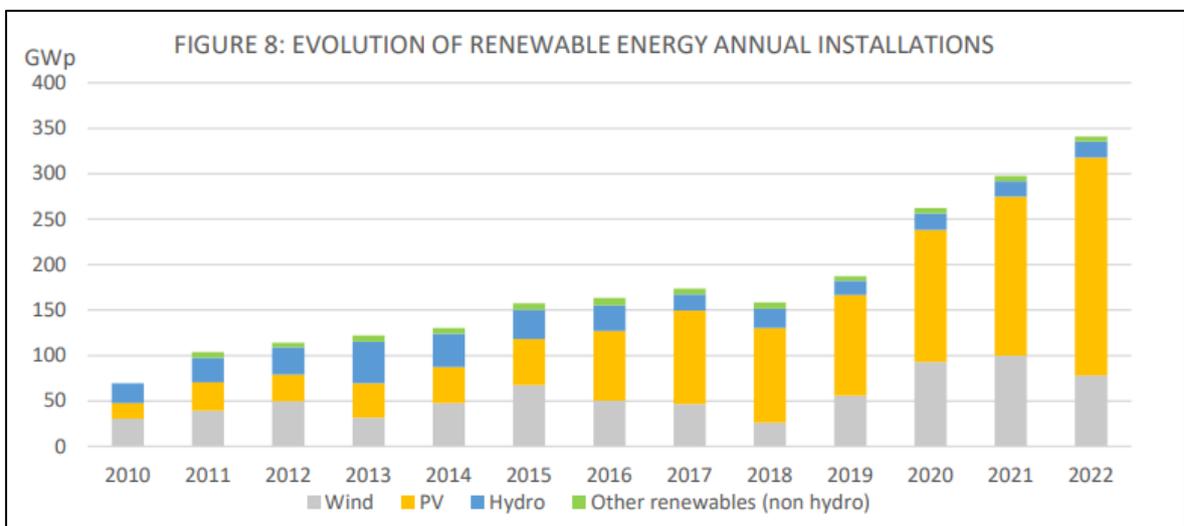
**Espejo de agua:** Superficie de fuente de agua que puede ser caudaloso.

**MDT:** Tabla maestra de datos de donde se toman referencia a los valores de estudio, esta tabla debe garantizar que los datos son de calidad.

## Introducción

La mitigación de los gases de efecto invernadero, responsables de la actual crisis climática, ha impulsado la implementación de nuevas formas de energía. En 2015, la conferencia de Naciones Unidas por el Cambio Climático (COP21) desarrollada en París, acordó realizar acciones para contener el aumento de la temperatura global del planeta a menos de 1.5° centígrados, respecto de la temperatura pre-industrial. Hasta el 2020, 189 países se han adherido al acuerdo [9].

La utilización de fuentes renovables es un pilar importante dentro de las metas del desarrollo sostenible propuesto por la COP21, por tanto, se ha registrado una mayor inversión en el desarrollo de tecnologías de generación eléctrica de fuentes renovables. En la Figura 1.1 se muestra la evolución de instalaciones anuales de energía renovable. Dentro de éstas se encuentra la generación eléctrica fotovoltaica, que en 2022 representó aproximadamente el 50% de las nuevas instalaciones.

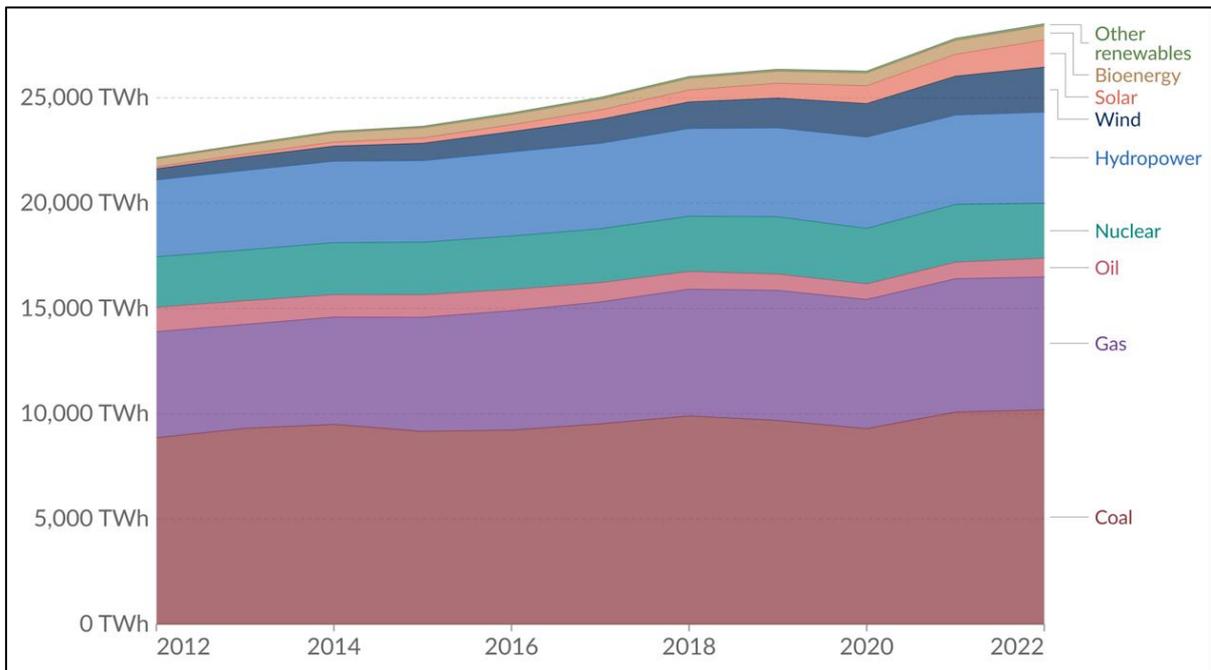


**Figura 1.1** Evolución de instalaciones anuales de energía renovable [10]

## Panorama mundial de generación eléctrica fotovoltaica

Desde el 2012 hasta el 2022 la generación eléctrica anual del mundo aumentó de 22169 TWh a 28527 TWh, mostrando un incremento relativo del 29%. Así mismo, la generación eléctrica por fuentes renovables pasó de 4711 TWh a 8533 TWh, representando un crecimiento del 81% [11]. Es decir, en 10 años el porcentaje de generación eléctrica anual

por fuentes renovables ha pasado de representar el 21.2% en 2012, de la generación eléctrica total, al 38.5% en 2022.



**Figura 1.2** Generación eléctrica por fuentes renovables. [11]

En la Figura 1.2 se muestra la generación eléctrica por energías renovables. La tecnología que presenta un mayor aumento dentro de los últimos 10 años es la generación eléctrica fotovoltaica, la cual pasó de producir 95.18 TWh en 2012 a 1290 TWh en 2022, representando un crecimiento del 1255% [12].

El modelo STEPS de la Agencia Internacional de la Energía (IEA por sus siglas en inglés), busca que para el 2050 la generación fotovoltaica sea la fuente renovable más utilizada a nivel mundial [13]. Para llegar a tener estos resultados se necesita inversión, estudio y desarrollo de las tecnologías asociadas a generación fotovoltaica, por lo tanto, se han creado varias alternativas tecnológicas para obtener una mayor generación, entre estas se encuentran los paneles solares flotantes, los sistemas de concentración fotovoltaico, los paneles solares sumergidos, etc. [14]. Estas tecnologías se enfocan en utilizar diferentes acercamientos a la generación eléctrica por celdas fotovoltaicas, resolviendo algunos problemas que presentan los sistemas de paneles solares convencionales.

## **Generación eléctrica fotovoltaica flotante**

La Generación Eléctrica Fotovoltaica Flotante (conocida como FPV por sus siglas en inglés) representa una tecnología que se fundamenta en la instalación de paneles solares sobre superficies acuáticas. En la actualidad, esta tecnología se implementa con un enfoque particular en su aplicación en entornos urbanos que cuentan con cuerpos de agua considerables, como ríos caudalosos o embalses, buscando así optimizar el aprovechamiento de espacios previamente utilizados. Además, se ha dirigido la atención hacia el desarrollo de instalaciones off-shore, permitiendo la instalación de plantas de generación eléctrica fotovoltaica en entornos marítimos [15].

Esta tecnología es relativamente joven, el primer sistema FPV fue construido en Aichi Japón en el 2007 [6]. Desde entonces el crecimiento de este sistema ha sido liderado por Asia, debido a que varios países de la región tienen grandes poblaciones que limitan el uso de tierra como en China y Vietnam, donde el 40% de la tierra se utiliza para el sector agrícola, sin embargo, en ambos existen grandes cuerpos de agua [16], por ejemplo, el río Mekong que atraviesa a China, Laos, Tailandia, Camboya, Vietnam y Myanmar, es un efluente utilizado para generación hidroeléctrica y generación fotovoltaica flotante, que registra 89 proyectos de generación fotovoltaica, con una capacidad instalada de 12285 MW y con una generación de 114180 GWh en 2019 [17].

Actualmente el líder en el mercado FPV es China, en el 2018 presentaron una capacidad instalada de 950 MWp, representando el 73% de la generación flotante global total (1.3 GWp) [18]. Se prevé que para el 2030, el sector tendrá un crecimiento de 133%, considerando a China, India y Estados Unidos como los países de mayor crecimiento en generación eléctrica FPV [19].

El crecimiento de la aplicación de esta tecnología se debe a los beneficios que presenta, por ejemplo, las estaciones FPV pueden ser instaladas sobre varias superficies de agua ya sea en fluviales naturales o volúmenes controlados, también traen beneficios ambientales como reducir la evaporación de agua y preservar ecosistemas acuáticos, reduce la proliferación de algas y ayuda a controlar la erosión generada por olas en reservorios [20]. Estos sistemas flotantes pueden ser instalados en lugares de tratamiento de aguas, represas, lagos y canteras, reservorios, superficies de suministros de agua, granjas de acuicultura y represas hidroeléctricas.

En el informe técnico publicado por Estados Unidos en 2021, se detalla que el costo de instalación de una planta flotante de 10 MW es aproximadamente un 25% más elevado en comparación con una instalación en tierra. Esta disparidad en los costos se atribuye a

diversos factores. En primer lugar, la ingeniería y los materiales requeridos para asegurar la flotación y estabilidad de los paneles solares sobre el agua son inherentemente más complejos y costosos. La exposición continua a condiciones ambientales adversas, como las olas y la salinidad, demanda la implementación de tecnologías y materiales de alta resistencia, contribuyendo al incremento de los costos de fabricación y mantenimiento.

Es crucial tener en cuenta que, si bien los costos pueden variar a medida que se desarrollen y perfeccionen las técnicas para el despliegue de sistemas flotantes, las proyecciones actuales sobre los costos de instalación indican que la brecha entre flotantes y convencionales se mantendrá alrededor del 20% hasta el año 2050 [21]. A pesar de esta diferencia inicial, la inversión en sistemas flotantes se ve compensada por un ahorro sustancial en costos de tierra. Específicamente, en entornos urbanos con restricciones de espacio, la capacidad de aprovechar cuerpos de agua existentes evita la necesidad de adquirir extensas parcelas de tierra, haciendo que, a largo plazo, la opción flotante resulte más económicamente eficiente.

Esta tecnología se mantiene en desarrollo constante, también se han identificado ventajas significativas en relación con los sistemas de tierra, una de ellas es el aumento de la eficiencia de los paneles solares flotantes, es decir, gracias a que tienen una mayor diferencia de temperaturas entre sus caras se tiene una mayor producción de potencia por el enfriamiento por la temperatura del agua. Esta característica se ha estudiado de manera continua en la última década, sin embargo, no se ha llegado a un consenso general sobre el efecto del enfriamiento, existiendo modelos que presentan una mejoría de la eficiencia de 1.5% y otros de hasta el 22% en comparación a la producción de un sistema de tierra [22], [23]. Por tanto, existe una clara necesidad de seguir estudiando el comportamiento del enfriamiento sobre los sistemas fotovoltaicos, pues puede ser clave para la toma de decisión de instalación de plantas fotovoltaicas flotantes o en tierra, debido al aumento de la generación eléctrica fotovoltaica.

### **Potencial fotovoltaico en el Ecuador**

El Ecuador posee una matriz de generación eléctrica proveniente mayormente de fuentes renovables, principalmente hidroeléctricas. En 2022 se registró una generación eléctrica total de 33008.30 GWh (26900.46 GWh fueron entregados al servicio público), la producción bruta por energía renovable corresponde al 76.11% del total generado, repartiendo la producción de la siguiente manera:

**Tabla 1.1** Generación eléctrica por tipo de energía. [24]

Tipo de Energía	Tipo de Central	Energía Bruta	
		GWh	%
Renovable	Hidráulica	24.635,16	74,63
	Biomasa	348,08	1,05
	Eólica	60,60	0,18
	Biogás	41,59	0,13
	Fotovoltaica	38,50	0,12
<b>Total Renovable</b>		<b>25.123,93</b>	<b>76,11</b>
No Renovable	Térmica MCI	5.366,38	16,26
	Térmica Turbogás	1.496,46	4,53
	Térmica Turbovapor	1.021,54	3,09
<b>Total No Renovable</b>		<b>7.884,37</b>	<b>23,89</b>
<b>Total general</b>		<b>33.008,30</b>	<b>100,00</b>

En la Tabla 1.1, se puede observar que el papel de las renovables es significativo en la producción eléctrica nacional, sin embargo, el aporte de las energías renovables no hidráulicas es del 1.48%, donde la generación PV representa el 0.12%.

El Programa de Asistencia y Manejo del Sector Energético del Banco Mundial (ESMAP por sus siglas en inglés) ha categorizado al Ecuador como un país de potencial PV de 4305 kWh/m<sup>2</sup> posicionándonos en el ranking 155, esta categorización se vuelve relevante cuando se compara con países con mayor explotación en el sector PV, China tiene un potencial de 4127 kWh/m<sup>2</sup> estando en el ranking 161 y Estados Unidos un potencial de 4498 kWh/m<sup>2</sup> encontrándose en el ranking 147 [25]. Es decir, Ecuador tiene un potencial comparable con dos de los países con mayor influencia en el desarrollo y despliegue de la tecnología fotovoltaica, por tanto, el desarrollo y estudio de esta tecnología puede impactar positivamente dentro del Ecuador y su matriz energética.

## **Ecuador y la generación fotovoltaica flotante**

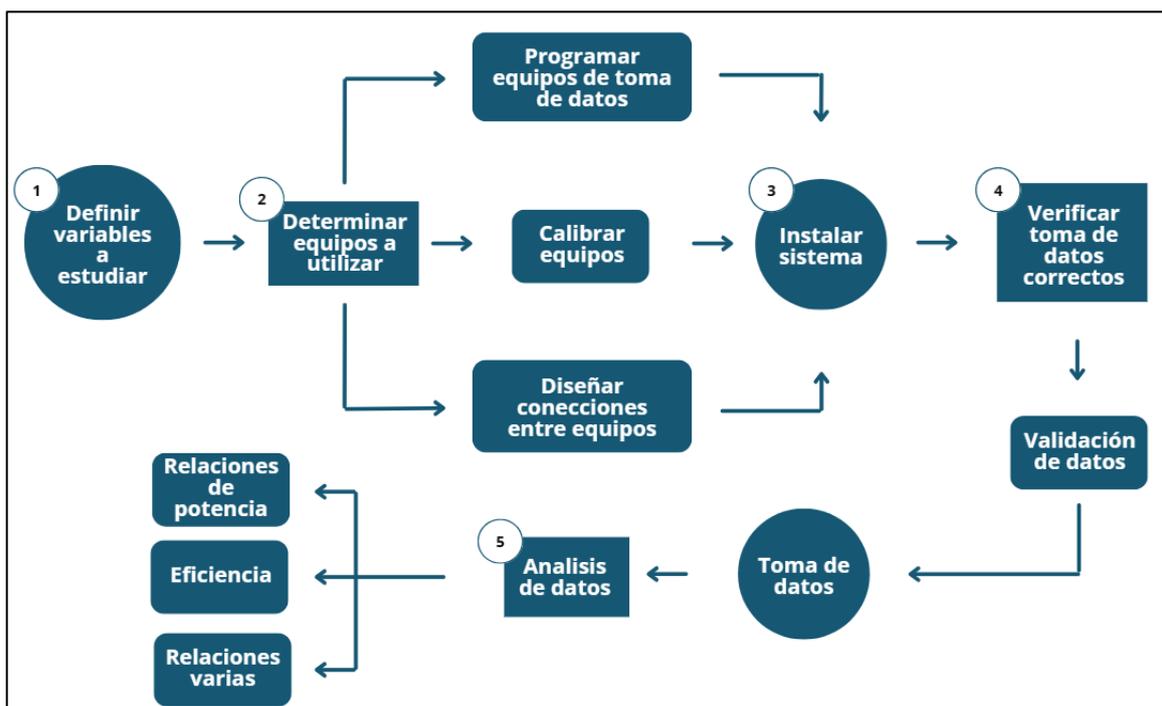
Actualmente, Ecuador no posee plantas fotovoltaicas flotantes instaladas. Sin embargo, existen algunos proyectos que buscan su implementación. El proyecto Fotovoltaico Flotante Mazar, se ubica en la reserva hídrica de la planta hidroeléctrica Mazar en el cantón de Azogues y Cuenca. Este proyecto se basa en la instalación de módulos flotantes con una potencia de 201 MWp, la cual tiene una generación promedio de 292 GWh/año. Esta instalación tiene una longitud de 15km de largo, comienza en el reservorio de Mazar y termina en la bifurcación del río Paute [26]. La Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC EP), en colaboración con la Agencia Francesa de Desarrollo (AFD), ha diseñado un portafolio de siete proyectos de generación fotovoltaica, sumando una capacidad total de 1.580 megavatios pico (MWp). Distribuidos en provincias como Imbabura, Pichincha, Cotopaxi y Chimborazo, estos proyectos se desarrollan con un financiamiento de 270.000 euros provenientes del programa "Fondos para la promoción de experticia francesa" (fondos FEXTE). Las fases del estudio, ejecutadas en conjunto con Tractebel Engie, abarcan la evaluación del recurso solar, la identificación de sitios óptimos, y la elaboración de estudios de prefactibilidad, proporcionando a CELEC EP una sólida base para la siguiente etapa de estudios de factibilidad y el desarrollo futuro de proyectos solares [27].

También, existen proyectos en fase de prefactibilidad, por ejemplo, se ha desarrollado una campaña de estudio para incorporar una planta de generación fotovoltaica flotante en la represa hidroeléctrica de Manduriacu, con la finalidad principal de evitar la evaporación del embalse y aumentar la eficiencia de la generación eléctrica alrededor de un 12,5% [28]. Este estudio muestra que el agua evaporada disminuirá hasta en 80%, mostrando las ventajas y oportunidades que permiten utilizar esta tecnología.

Por el potencial en el Ecuador de instalación de plantas flotantes PV, es necesario estudiar los impactos de esta tecnología, sin embargo, al no poseer tantos años de desarrollo como los sistemas PV en tierra, se debe realizar varias campañas de toma de datos experimentales para tener fuentes que permitan realizar estudios a futuro. Por este motivo se plantea este proyecto como una campaña de toma de datos experimentales en el reservorio de Cumbayá en Quito, Ecuador para poder realizar un modelo de enfriamiento y poder comparar los resultados de eficiencia entre un sistema fotovoltaico de tierra con uno flotante, para dilucidar las ventajas y los desafíos sobre el uso de esta tecnología.

## 2 METODOLOGÍA

Se realizó una campaña de toma de datos desde noviembre hasta diciembre (2023) en el reservorio de Cumbayá en Quito, Ecuador, con lo cual se podrá comparar los resultados de un panel fotovoltaico flotante con un panel fotovoltaico de tierra. A continuación, se muestra un diagrama de proceso de toma de datos y análisis de estos para presentar los análisis y conclusiones de esta campaña.



**Figura 2.1** Diagrama de metodología. Fuente propia

Para obtener los datos se decidió seguir la metodología de la Figura 2.1, esta puede ser dividida en 3 partes:

- Primero, se definió las variables a estudiar y se determinaron los equipos a utilizar
- Segundo, se instaló el sistema de toma de datos y se verificó que los resultados sean correctos
- Tercero, se analizó los datos obtenidos.

Lo desarrollado en cada uno de estos pasos se desarrolla a continuación desde la 2.1 hasta la sección 2.5. Se debe además mencionar que estos resultados serán comparados con los resultados experimentales de un panel solar en tierra tomados en las mismas condiciones ambientales.

## 2.1 Definición de variables a estudiar

Para realizar un modelo de enfriamiento se necesita las siguientes variables ambientales: temperatura de panel solar, temperatura de agua, temperatura ambiente e irradiancia. Además, es necesario conocer las variables de generación eléctrica: corriente y voltajes generados para determinar la potencia. La humedad y la velocidad del viento, a pesar de ser características importantes, en este caso de estudio serán omitidas.

Las variables mencionadas son esenciales, pues para poder desarrollar un modelo de enfriamiento con el cual se pueda comparar los resultados del sistema fotovoltaico flotante con uno de tierra. Con estas consideraciones, las variables a tomar son temperatura ambiente, temperatura del agua, temperatura del panel, irradiancia, voltaje y corriente.

## 2.2 Determinación de equipos

Para poder medir las variables definidas en la anterior sección se utilizaron los equipos que se muestran a continuación:

**Tabla 2.1** Equipos utilizados. Fuente Propia

Cantidad	Equipos	Modelo	Características
1	Datalogger	FieldLogger	Equipo de toma de datos de 8 entradas analógicas configurables fue utilizado por su capacidad de guardar señales de tensión, corriente, termopares Pt100 y Pt1000
2	Termopar	Tipo J	Termopares de 2 y 5 metros
2	Panel solar	100 Wp	Panel solar con dimensiones 1.02 x 0.67 m <sup>2</sup>
1	Controlador MPPT	ML2420 RoHS	Controlador Solar de 12/24 V
1	Controlador PWM	-	Controlador Solar de 12 V
2	batería	12V PoWEST	Dos baterías de 12V18Ah y 12V9Ah
1	Piranómetro	MS-40 EKO	Instrumento de medición de irradiancia
1	Sensor de corriente	ACS709 Pololu	Sensor optimizado para trabajo en un rango de -37.5/37.5 A
1	Sensor de voltaje	FZ0430	Sensor optimizado para trabajo con voltaje máximo de 25 V

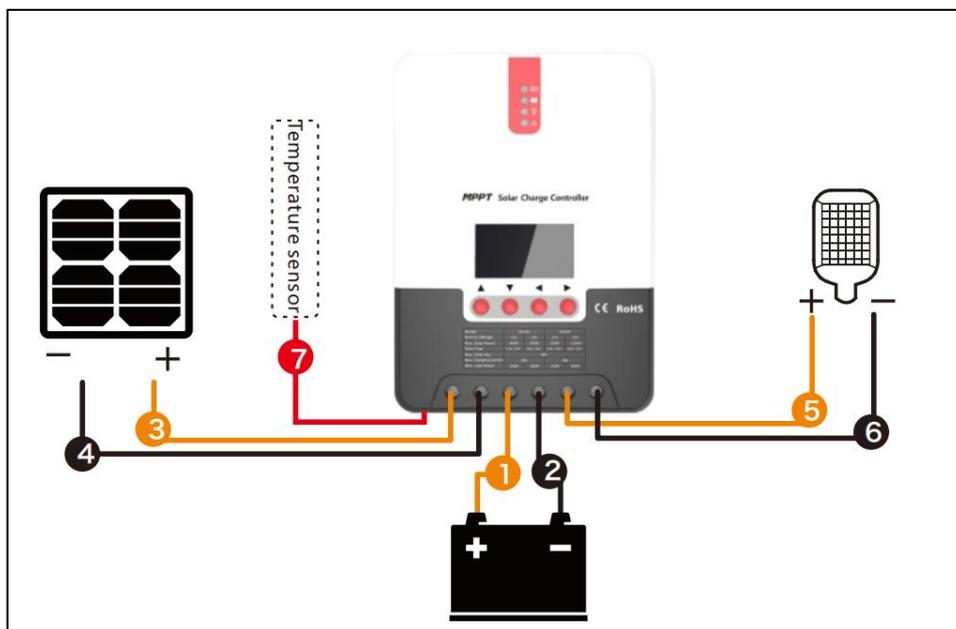
En la Tabla 2.1 se muestran los equipos utilizados para la toma de datos. Se usó un datalogger FieldLogger de Novus para registrar las mediciones. El sistema fotovoltaico a ser medido consta de un panel solar de 100Wp, un controlador MPPT y una batería

recargable de 12V-18Ah. Para la alimentación del datalogger se usó un sistema fotovoltaico independiente. La medición de radiación se llevó a cabo con un piranómetro MS-40.

Para asegurar que el sistema proporciona la máxima potencia fotovoltaica posible, se usó un sistema de descarga

### Sistema fotovoltaico

El sistema fotovoltaico flotante se basa en la conexión de 4 equipos principales, el panel solar, el controlador, la batería y la carga. A este sistema inicial se debe conectar el sensor de corriente y voltaje para realizar la toma de datos, estas conexiones se pueden observar en la subsección de diseño de conexiones.



**Figura 2.2** Conexión de sistema fotovoltaico. [29]

En la Figura 2.2 se muestra una imagen simplificada de la conexión de los equipos para el sistema flotante. Además, se muestra el orden de conexión del sistema.

### Programación de equipos

Se configuró cada canal de medición a través del software de configuración del Novus. Se utilizaron cinco canales analógicos, dos para medir voltaje (voltaje y corriente), dos para medir temperatura (temperatura de agua y panel solar) y uno para medir irradiancia solar.

Para cada canal se utilizó una calibración dependiendo de la señal que entreguen los equipos a excepción de los termopares, debido a que la temperatura se registra sin calibración. Se programó el datalogger para que realice un registro de datos de cada canal cada 5 minutos sin aplicar filtro digital.

**Tabla 2.2** Señales y operaciones. Fuente propia.

Variable	Señal en canal	Salida registrada
Voltaje ( $V_s$ )	0 -10V	$V=V_s*5$
Corriente ( $I_s$ )	0 -10V	$I=(I_s-2.5)/0.028$
Irradiancia ( $E_s$ )	0 - 20mv	$E= E_s*76.9$

En la Tabla 2.2 se muestra la programación de los sensores en el datalogger, donde las variables  $V_s$ ,  $I_s$  y  $E_s$  son las señales entregadas por los sensores. Estos valores se encuentran en el sistema internacional. El controlador de carga MPPT se configuró al modo de carga Nro. 17. En este modo, el controlador mantiene la batería en descarga constantemente energizando los focos led.

### Calibración de equipos

Luego de tener el equipo de toma de datos configurado se utilizaron dos canales de este para verificar la calibración del piranómetro MS-40 (clase C) utilizando otro piranómetro de mayor clase, el MS-80 (clase A). Para esto, se registraron datos con ambos equipos en una semana, se compararon los valores y se corrigió el factor de sensibilidad del MS-40 para que los valores registrados sean menos dispersos entre sí.

**Tabla 2.3** Valores de calibración piranómetro. Fuente propia.

Calibración Piranómetro		
Señal	Fábrica	Corrección
12 $\mu$ V	16000 W/m <sup>2</sup>	1538.46 W/m <sup>2</sup>

En la Tabla 2.3 se pueden observar en la os valores de calibración de fábrica y el valor corregido a través de la comparación con el piranómetro patrón.

Para verificar el correcto funcionamiento del panel solar, de igual forma se revisó durante una semana los datos proporcionados de voltaje y corriente para confirmar que los datos no fueron atípicos y que mantenían coherencia con las condiciones ambientales de las fechas donde se tomaron esos datos.

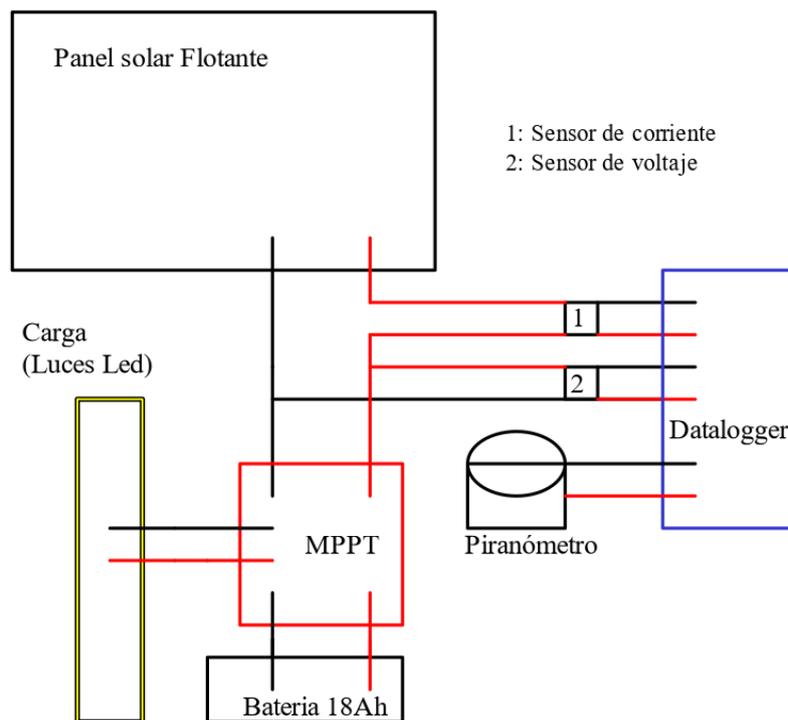
Los termopares pasaron por una toma de datos experimentales de las temperaturas de agua en una botella y la temperatura de una ventana de vidrio para verificar los cambios de temperatura en tiempo real utilizando la herramienta de diagnóstico de la aplicación de Novus.

Una vez verificado que los equipos de señal y el equipo de toma de datos realizan la toma de datos adecuadamente se procedió diseñar las conexiones necesarias para obtener un sistema autónomo de toma de datos.

### Diseño de conexiones

El sistema de toma de datos a instalar se basa en dos sistemas fotovoltaicos, el sistema flotante y el sistema datalogger. Los dos sistemas son necesarios para realizar la experimentación de manera automatizada, donde las variables del sistema flotante serán analizadas a través del datalogger.

El sistema flotante se basa en: el panel solar flotante, el controlador MPPT, la batería de 12V18Ah, y los focos led de descarga. A este sistema se le agrega un sensor de voltaje en paralelo al panel flotante y un sensor de corriente en serie al positivo del panel. El sistema datalogger basa su alimentación en un panel solar en tierra de 100Wp.



**Figura 2.3** Conexiones de sistema. Fuente propia

En la Figura 2.3 se puede observar la conexión del sistema al datalogger. Cabe recalcar que en el diagrama falta la conexión de la temperatura del panel solar y la de temperatura de agua, pues estas van conectadas directamente al datalogger.

## 2.3 Instalación del sistema

Una vez verificado que el sistema funciona correctamente, se procedió a diseñar la estructura de flotación, las cajas de distribución donde se mantendrán a los equipos y los apoyos del panel solar de tierra para que este no esté en contacto con el suelo.

### Diseño de estructura de flotación

Para que el panel solar pueda flotar sin riesgos de volcarse sobre el agua, se sobre dimensionó la estructura de flotación, utilizando dos barriles de plástico de 55 galones y un marco de barras de acero.

**Tabla 2.4** Características flotador. Fuente propia.

Estructura de flotador		
Características	Barriles	Marco de acero
Peso	10 kg	12 kg
Ancho	-	2 m
Altura	0,9 m	1.2m
Diámetro	0,6 m	-

Las características físicas de la estructura del flotador se pueden observar en la Tabla 2.4. Con estas condiciones se calculó la masa total que puede soportar el sistema con un volumen sumergido de los barriles del 70%. Para esto se utilizó la ley de empuje de Arquímedes. El resultado es el siguiente:

$$E = \rho_w \cdot g \cdot V_b = 2859,498N$$

### Ecuación 2.1 Fuerza de empuje

La ecuación 2.1 describe el empuje  $E$  en función de la densidad del agua  $\rho_w$ , la aceleración gravitacional  $g$ , y el volumen sumergido  $V_b$ . Esta fuerza es la necesaria para sumergir el 70% del volumen de los barriles, considerando que en total la estructura tendría una masa de 32 Kg, se necesitaría una masa de 259,2 Kg para sumergirlo. Esto fue comprobado experimentalmente para garantizar que el sistema de flotación fue sobre dimensionado. Se puede observar a la estructura flotando en la Figura 2.4.



**Figura 2.4** Estructura de flotador. Fuente propia.

En la Figura 2.4 se puede observar a la estructura amarrada en 3 puntos distintos para que no pueda girar a causa de las corrientes que se generan en el reservorio, a los dos barriles, y al marco de acero. Como se puede observar el volumen sumergido es mínimo a causa de la fuerza de empuje que este presenta.

### **Diseño de cajas de distribución**

Para mantener los equipos en guardados evitando eventos que puedan dañar a los equipos, se utilizaron dos cajas de distribución, en la primera, se instalaron el controlador MPPT y las dos baterías, en la segunda, se instalaron los sensores, el datalogger y los transformadores de voltaje.



**Figura 2.5** Cajas de distribución. Fuente propia.

En la Figura 2.5 se pueden observar las cajas utilizadas, que son IP65 y suficientemente grandes para que el calentamiento de equipos no sea significativo.

### **Sistema instalado**

Finalmente se llevaron los equipos a instalar al reservorio de Cumbayá en Quito, Ecuador. Se instaló el panel solar flotante a 4 metros de cada orilla para evitar efectos de sombra y se instaló al panel solar de tierra junto con cada caja de distribución como se muestran en la Figura 2.6 y 2.7.



**Figura 2.6** Paneles solares en Tierra. Fuente propia.

En la Figura 2.6 muestra el sistema instalado en tierra con los dos paneles, se puede observar al piranómetro en la esquina inferior izquierda del panel solar, debajo de este se encuentra la caja de distribución pequeña y junto a ella la caja grande.



**Figura 2.7** Panel solar Flotante. Fuente propia.

En la Figura 2.7 se encuentra el panel solar flotante instalado sobre la superficie de agua, este está sujeto con cuerdas para que evitar que la corriente lo mueva o gire y en caso de que el nivel del agua baje, las cuerdas se destensan por el tipo de nudo utilizado.

Una vez instalado el sistema se dejó en las instalaciones por una semana laboral sin tomar datos, verificando que no existan problemas o riesgos a causa de fallas de hermeticidad, problemas de seguridad en el reservorio, vaciado de agua, conflictos con las aves del sector, etc. Pudiendo verificar que no existen los mencionados riesgos ni fallas se procedió con la toma de datos.

## **2.4 Verificación de datos**

Una vez instalado el sistema, se realizaron dos etapas de toma de datos: en la primera fase de toma de datos se verificó que los datos obtenidos eran coherentes, que los sensores y los equipos estaban registrando adecuadamente la información y que no existían problemas a causa de la instalación de éstos. La segunda etapa consistió en la toma automatizada de datos, revisando el registro de éstos cada 2 días durante aproximadamente tres semanas.

### **Validación de datos**

Se verificó que los datos de irradiancia no sobrepasen los  $1200 \text{ W/m}^2$  ya este valor ya es considerablemente alto comparándolo con la constante solar ( $1361 \text{ W/m}^2$ ). También se revisó que el voltaje del panel solar se encuentre en un rango que corresponda al panel solar utilizado (0-20V), y así mismo, que la corriente máxima no se encuentre un rango alto (8-12A). Con relación a las temperaturas se verificó que la toma de datos sea continua y que no existan saltos de temperatura injustificados.

En esta etapa se realizaron varias adaptaciones a la carga del sistema flotante para que se mantenga en descarga constante. Se agregaron luces LED hasta conseguir que la curva de potencia sea similar a la curva de irradiancia.

### **Toma de datos**

Una vez comprobado que la medición de datos es adecuada se comenzó con la etapa de toma de datos automatizada, para lo cual se dejó al sistema funcionando sin intervención mayor. En esta etapa se revisó al sistema cada dos días, se registraron y analizaron los datos continuamente para verificar que no existan problemas en la toma de datos y en los equipos, se limpió los paneles solares de los desperdicios dejados por las aves y el polvo acumulado, y se revisaron los nudos de las cuerdas que sostenían al sistema flotante.

La toma de datos duró un mes aproximadamente y el registro de datos se puede observar en el ANEXO I.

## 2.5 Análisis de datos

Con los datos registrados se procedió al tratamiento de éstos utilizando las 5 características de calidad de datos: Validación, Completitud, Consistencia y Uniformidad, Exactitud. Siguiendo estas 5 características se puede obtener datos de alta calidad. Se debe detallar que los valores que no cumplan estas características no serán tomados en cuenta en el estudio. Para realizar los análisis que se aprecian a continuación se utilizó un programa propio desarrollado en lenguaje Python.

- La validación se refiere a la revisión de características a cumplir de cada variable en su formato y no en su forma, por ejemplo, que la fecha mantenga su formato y no existan datos de tipo texto en las variables numéricas. En caso de encontrar estos registros no cumplirá con esta característica.
- La completitud, se refiere a la verificación de que no exista datos faltantes, por ejemplo, que no se tengan registros nulos en fecha, hora, para que pueda ser identificado el momento de obtención de cada variable.
- La consistencia, se refiere a inspeccionar que los datos no se contradigan entre sí por cada registro, por ejemplo, si se tiene un valor de potencia mayor a cero en la noche esta sería clasificada como inconsistente ya que en la noche no se tiene luz solar que permita la generación fotovoltaica.
- La uniformidad, se refiere a que los datos mantengan la misma unidad de medida, por ejemplo, al momento de reprogramar el datalogger se pueden registrar señales en diferentes unidades, los datos que no cumplan con la característica de uniformidad serán descartados.
- La exactitud, se refiere a la identificación del rango de valores típicos para cada una de las variables a estudiar. Se consideran valores atípicos aquellos registros que se encuentren por encima o por debajo de los parámetros establecidos como aceptables, por ejemplo, si se establece un rango de valores típicos de temperatura entre 10°C y 50°C, y se registra un valor de 200°C se considerará atípico y por tanto no se lo tomará en cuenta para el estudio. Los rangos no atípicos para cada variable se pueden encontrar en la Tabla 3.1.

Para determinar los rangos típicos se utilizó el criterio del rango Inter cuartil, en el cual todos los datos que se encuentren fuera de un rango son considerados fuera del caso de estudio, las ecuaciones utilizadas son las siguientes:

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad V_{min} = Q_1 - 1,5 \cdot IQR \quad V_{max} = Q_3 + 1,5 \cdot IQR$$

**Ecuación 2.2** Ecuaciones para determinar datos atípicos

En la ecuación 2.2 IQR es el rango-intercuartil y cada Q representa su cuartil respectivamente.

Después de determinar que los datos cumplan con estas características, se realizó una tabla de datos maestra (MDT por sus siglas en inglés), con la cual se realizaron todos los análisis relacionales (ANEXO II).

### **Relaciones de potencia**

En la tabla maestra se agregó la variable correspondiente a la potencia multiplicando los valores de corriente y voltaje. Con esta información se desea encontrar el rango de tiempo de mayor generación de potencia, también las correlaciones con cada variable de estudio y la relación entre la potencia, la irradiancia y la temperatura del panel solar.

- **Primero:** se realizó el análisis de correlación Pearson de la potencia con las otras variables estudiadas para estimar si se tiene una relación lineal entre las variables.
- **Segundo:** se determinó el rango de tiempo donde se encuentra el top 25% de los valores de potencia para definir el rango de tiempo de mayor potencia.
- **Tercero:** se utilizó el análisis de dos gráficos de potencia vs irradiancia (el primero con todos los datos de potencia y el segundo comparando todos los datos mayores al cuartil 75), donde la temperatura se presenta como color para identificar el rango de temperaturas. Para interpretar las relaciones entre la potencia, irradiancia y la temperatura del panel.

### **Eficiencia**

El cálculo de la eficiencia se obtuvo la relación entre la potencia generada y la potencia que recibe el panel. Se determinó la eficiencia del panel en cada instante con la ecuación utilizada a continuación:

$$\eta = \frac{P}{E \cdot A} \cdot 100\%$$

#### **Ecuación 2.3 Eficiencia**

La Ecuación 2.3 muestra la eficiencia del panel solar, donde P es la potencia del panel, E es la irradiancia y A el área de este, donde se interpreta como la relación entre la potencia generada y la potencia que recibe el panel a causa de la irradiancia.

- **Primero:** se realizó un análisis de caja sobre los datos de eficiencia para identificar el rango más común (IQR) y compararlo con la media de los datos utilizando las expresiones de la Ecuación 2.2.

- **Segundo:** se construyó con un histograma la eficiencia para poder visualizar bajo que valores se encuentran ms coincidencias registradas.
- **Tercero:** se realizó un análisis de la eficiencia con el Z-Score para eliminar los valores atípicos de la eficiencia para obtener un promedio más ajustado.
- **Cuarto:** se presentó la gráfica eficiencia vs irradiancia donde se toma el rango inter-cuartil de la irradiancia para identificar los valores de eficiencia en el rango más común de irradiancia.
- **Quinto:** se realizó la Tabla 3.5 donde se muestra el número de registros para 4 rangos de irradiancia donde el valor menor y mayor corresponden a los valores mínimos y máximos del rango inter-cuartil. En dicha tabla se indica el rango de la temperatura del panel, la potencia promedio y la eficiencia promedio.

### **Relaciones varias**

Para identificar las relaciones entre variables se determinó las correlaciones entre todas las variables para todo el grupo de datos, los resultados se pueden observar en la Figura 3.6.

El código utilizado para obtener todos los resultados se puede observar en el ANEXO III.

### 3 RESULTADOS

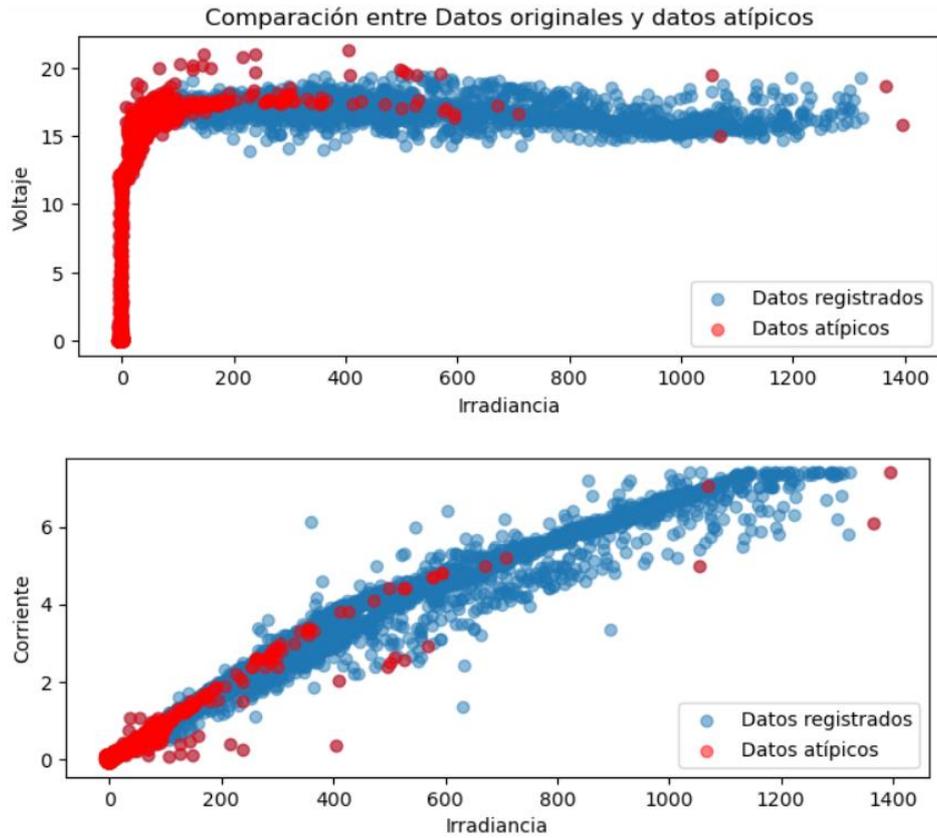
Luego de una campaña de aproximadamente 3 semanas (29/11/2023 hasta 21/12/2023) se obtuvo más de 6400 datos para cada variable, después de desarrollar la evaluación de criterios de la sección 2.5 se obtuvo los valores adecuados para obtener la MDT sin valores atípicos.

**Tabla 3.1** Rangos no atípicos. Fuente Propia.

	<b>Corriente (A)</b>	<b>Piranómetro (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temp. Agua (°C)</b>	<b>Temp. Panel (°C)</b>	<b>Voltaje Flotante (V)</b>
<b>Q1</b>	1,02725	117,0383	15,964	18,5	15,86925
<b>Q3</b>	4,58525	614,2723	17,61525	25,4	17,26825
<b>IQR</b>	3,558	497,234	1,65125	6,9	1,399
<b>Valor mínimo</b>	0	0	13,48713	8,15	13,77075
<b>Valor máximo</b>	9,92225	1360,123	20,09213	35,75	19,36675

La Tabla 3.1 se muestra valores máximos y mínimos de los rangos no atípicos para cada variable. Se utilizó el criterio del rango inter-cuartil (IQR) para determinar dichos rangos y excluir los valores atípicos con la utilización de las expresiones mostradas en la Ecuación 2.2. Además, el tiempo de estudio se seleccionó a partir del rango entre 5:30 AM y 6:30 PM, debido a que, fuera de este horario se tiene muy poca luz solar, ocasionando la recolección de información que no aporta valor al análisis.

Con estos datos se formó la MDT, reduciendo las observaciones de 6478 a 2390. Donde no se encuentran valores nulos, datos con unidades combinadas, datos faltantes ni valores incoherentes.



**Figura 3.1** Gráficas de Corriente y Voltajes vs Irradiancia. Fuente propia

En la Figura 3.1 se muestra la comparación de los datos originales en azul y los datos atípicos en rojo. Como ya se mencionó, los valores atípicos fueron determinados validando las características de la sección 2.5, donde se indica que se eliminaron los datos registrados donde no se presenta irradiancia, también se eliminaron los datos según el criterio de los rangos inter-cuartiles, y los registros que no cuenten con las características de validación, completitud, consistencia, uniformidad y exactitud. Además, se puede observar que la mayor concentración de datos no utilizados se encuentra en zona de irradiancia menor a 200 W/m<sup>2</sup>.

### 3.1 Resultados

#### Potencia

Las correlaciones con la potencia se pueden observar a continuación:

**Tabla 3.2** Correlaciones entre variables y potencia. Fuente propia.

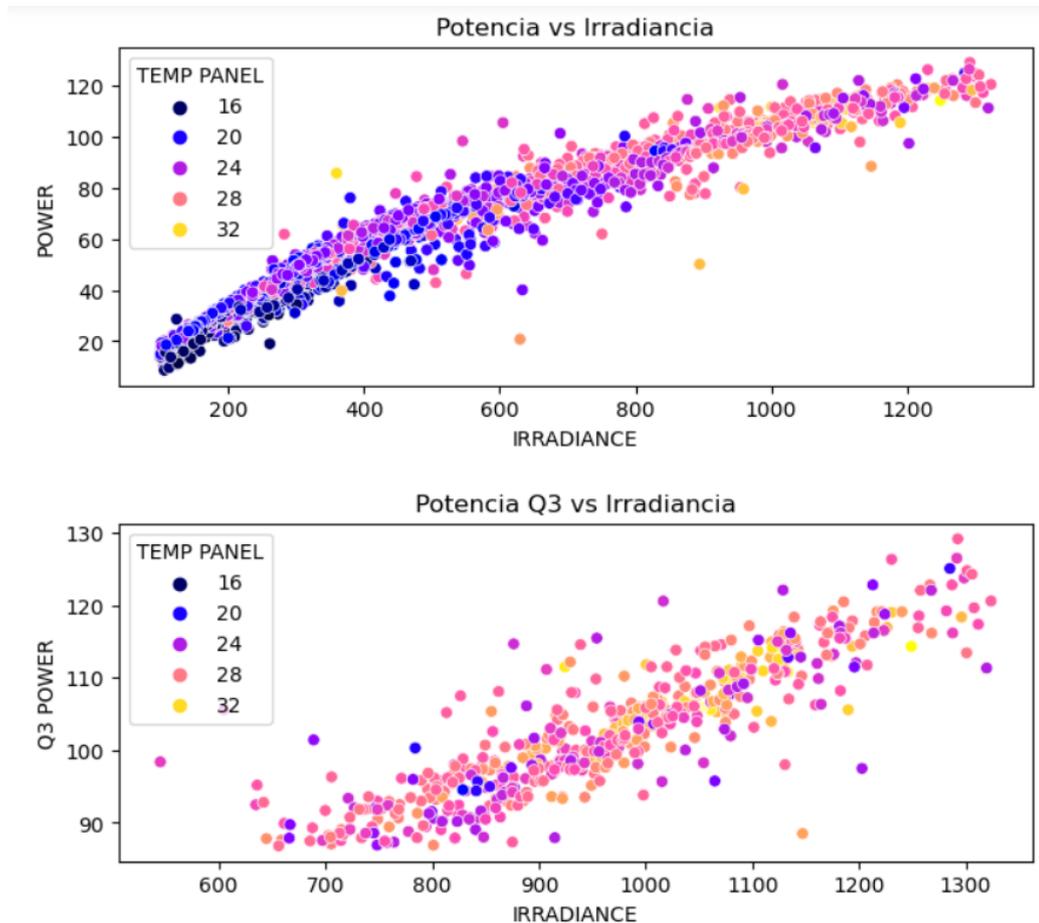
<b>POWER</b>	<b>CURRENT</b>	0,993266
	<b>IRRADIANCE</b>	0,966227
	<b>TEMP PANEL</b>	0,676514
	<b>TEMP WATER</b>	-0,23088
	<b>VOLTAGE</b>	-0,43331

La Tabla 3.2 muestra como la potencia presenta una gran correlación con la corriente y la irradiancia, una correlación media con la temperatura del panel y una correlación inversa con la eficiencia.

**Tabla 3.3** Información de Q3 de potencia. Fuente propia.

Nro Observaciones	Q3 POWER	T_min	T_max
598	86,77	9:07:53	15:52:53

En la Tabla 3.3 se puede observar que existen 598 observaciones mayores al 75% de datos de potencia (86,77 W) y que el rango de tiempo donde se tienen estos datos va desde las 9:07 en la mañana hasta las 15:52 en la tarde, con esto, se esclarece que se pueden registrar valores de potencia mayores a la media (64,12W) el 50% del tiempo, correspondiente a los valores más altos de irradiancia solar.

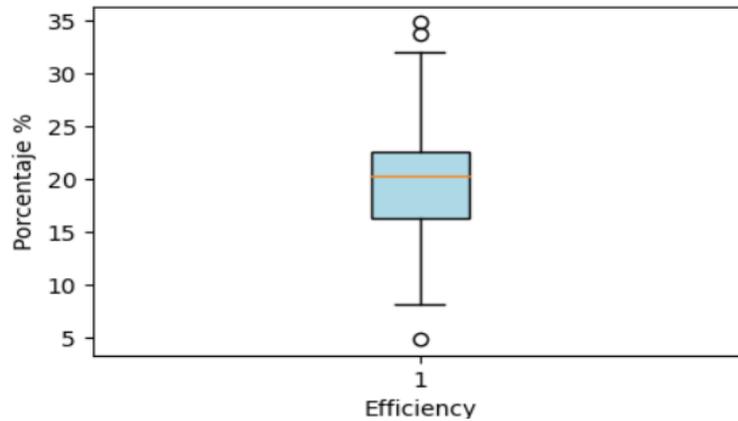


**Figura 3.2** Gráficas Potencias vs Irradiancia. Fuente propia.

En la Figura 3.2 se observa la correlación entre la potencia y la irradiancia, con la temperatura de panel como código de color. Se puede observar que la temperatura del panel es mayor mientras aumenta la irradiancia. También, se puede observar que el crecimiento de potencia disminuye mientras aumenta la irradiancia.

## Eficiencia

Como se menciona en la sección 2.5, se utilizó la Ecuación 2.3 para obtener los valores de eficiencia en cada instante, a partir de estos datos se realizó el gráfico de caja para identificar el rango más común de la eficiencia y su media.



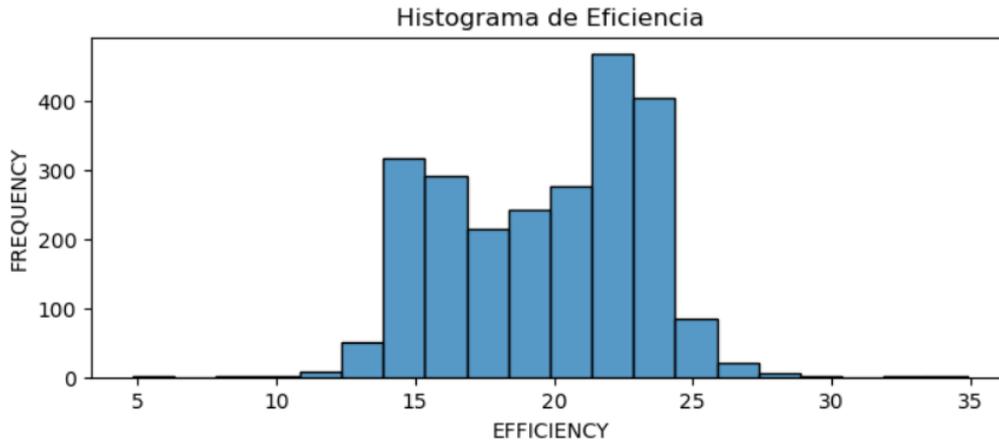
**Figura 3.3** Gráfico de caja para eficiencia. Fuente propia.

La Figura 3.3 muestra el gráfico de caja de la eficiencia, donde la mitad de los datos se encuentran por debajo de una eficiencia de 22.67%. Además, se identifican valores atípicos sobre el Q3 (22.676).

**Tabla 3.4** Información de eficiencia. Fuente propia.

Q1	Q3	Media
16,348	22,676	19,697

En la Tabla 3.4 se muestra que el 50% de los datos, a los cuales podemos llamar comunes se encuentran dentro del 16.34 y 22.67% de eficiencia. Si bien estos valores son altos, se puede observar que la media de los datos de eficiencia es 19.697%. A partir de estos datos, se construyó un histograma para analizar las observaciones bajo ciertos rangos. El gráfico se puede observar a continuación.



**Figura 3.4** Histograma de eficiencia. Fuente propia.

En la Figura 3.4 se muestra que la mayor cantidad de datos se encuentran cerca del 22% de eficiencia con alrededor de 400 observaciones, sin embargo, el 75% de los registros se encuentran por debajo de este valor.

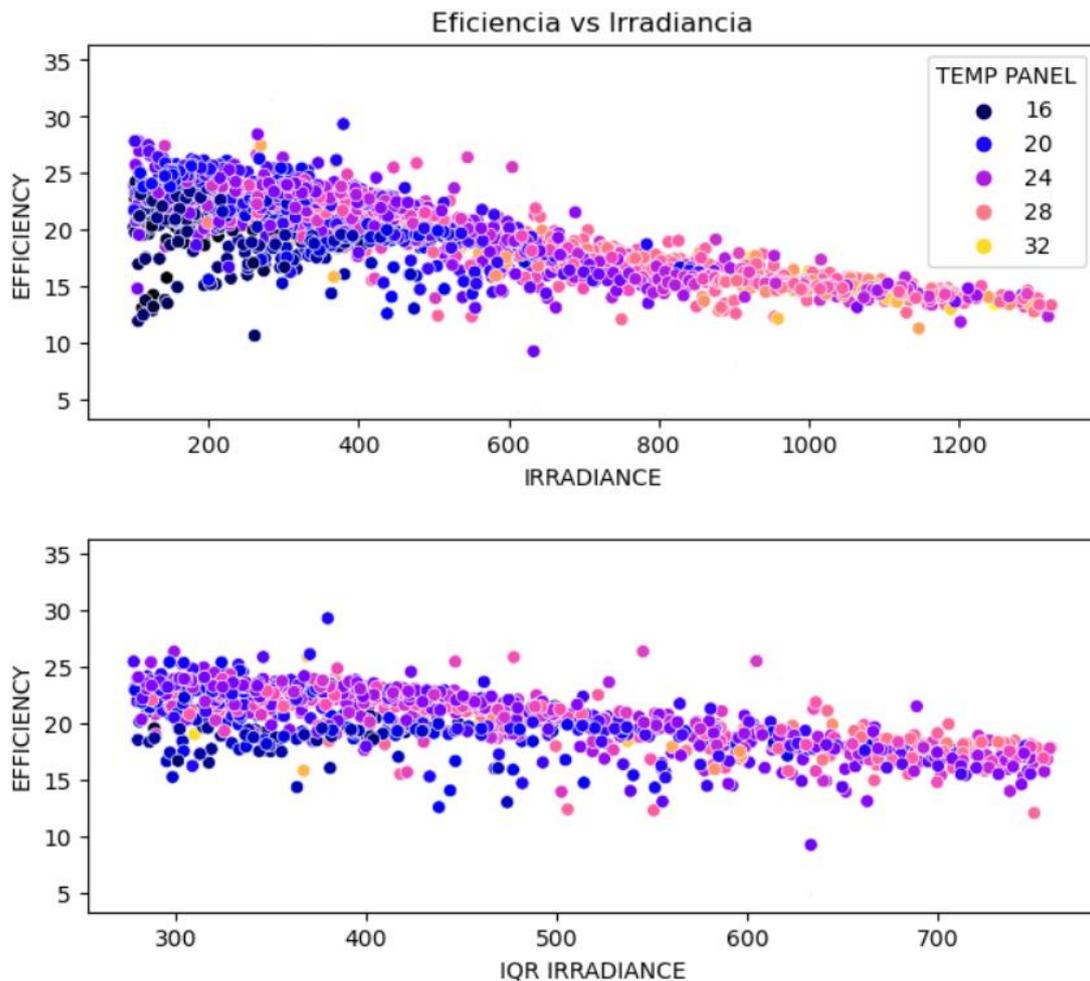
Se realizó el análisis Z-score de la eficiencia para identificar los valores atípicos y obtener un promedio más ajustado, el resultado es el siguiente.

**Tabla 3.5** Valores atípicos y diferencia de promedio eficiencia

<b>Eficiencias atípicas</b>	<b>Promedio con atípicos</b>
4,826	19,69773
8,2047	<b>Promedio sin atípicos</b>
32,0614	19,69133
33,7968	<b>Porcentaje de diferencia</b>
34,893	0,033%

En la tabla 3.5 se puede observar los valores atípicos determinados por el Z-score, además, se observa el promedio con y sin estos valores mostrando una diferencia porcentual menor al 1% al eliminar estos datos. Los valores atípicos mayores a 30% corresponden a valores de irradiancia menores a 400 W/m<sup>2</sup>.

A partir de los resultados descritos anteriormente, se puede observar que la mayoría de las observaciones de eficiencia se encuentra en un rango de 16% a 22% aproximadamente, por tanto, es importante comprar la eficiencia con la irradiancia y la temperatura para identificar relaciones.



**Figura 3.5** Eficiencia vs Irradiancia. Fuente propia.

En la Figura 3.5 se refleja una correlación inversa ya que, al crecer la irradiancia, la eficiencia decrece. Además, se puede observar que existen valores de temperatura muy variados ya que se muestra valores de temperatura bajos de temperatura en altas y bajas eficiencias, así también de las temperaturas altas.

Para determinar la relación entre la eficiencia, y la temperatura se realizó una tabla donde se pueda observar el rango de temperatura y la eficiencia promedio dentro del rango intercuartil de la irradiancia. Además, se incluyó al promedio de la potencia generada para poder identificar el comportamiento de la eficiencia.

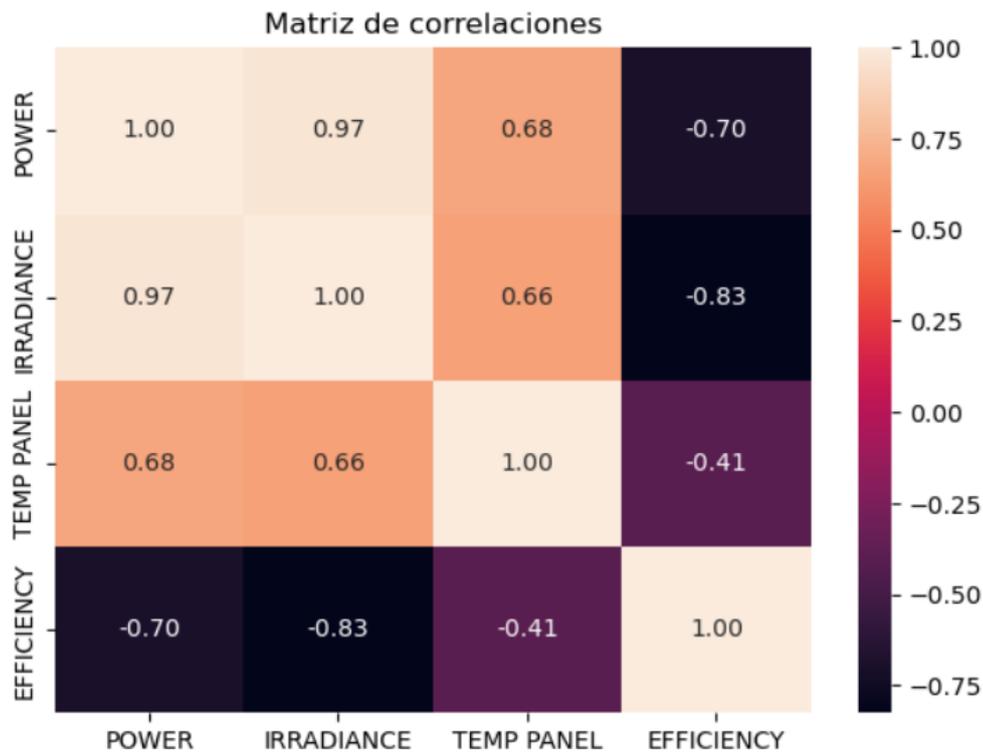
**Tabla 3.6** Comportamiento de variables en IQR Irradiancia. Fuente propia.

Nro de Observaciones	Rango de Irradiancia	Temperatura de Panel	Potencia Promedio	Eficiencia Promedio
492	277,90 - 398,32	15,15 - 32,57	51,33	22,16
335	398,32 - 518,75	16,18 - 32,67	64,22	20,87
203	518,75 - 639,17	18,39 - 32,81	73,36	18,60
163	639,17 - 759,60	19,39 - 31,56	82,46	17,34

En la Tabla 3.6 se puede observar que se presentan más observaciones en menores valores de irradiancia, además, al comparar los rangos de temperatura del panel se señala que los valores mínimos de cada rango varían entre uno y dos grados centígrados, mientras que los valores máximos son similares entre sí. También, se destaca que la eficiencia decrece entre 1 y 2 % cada 120 W/m<sup>2</sup>.

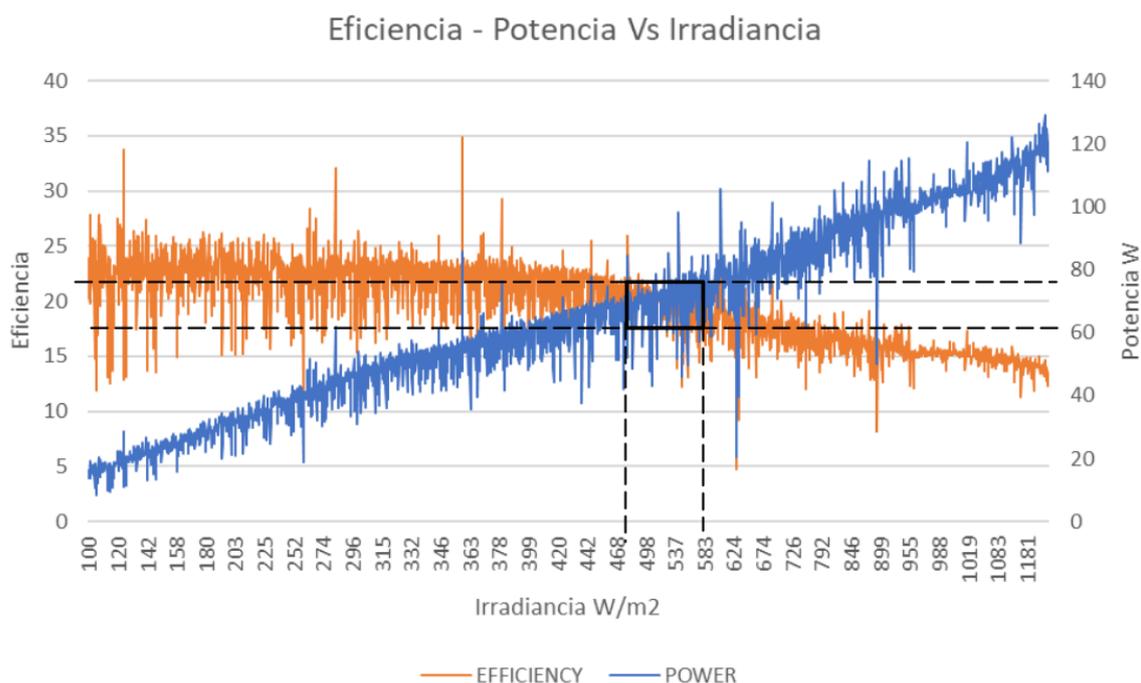
### Relaciones varias

Para identificar relaciones entre las otras variables se identificó la correlación entre cada una de ellas a partir de una matriz de correlaciones. El resultado se muestra a continuación:



**Figura 3.6** Matriz de correlaciones. Fuente propia.

En la Figura 3.6 se puede observar las correlaciones entre cada variable, se identificó que la irradiancia tiene una correlación inversa alta con la eficiencia, evidenciando la relación de decrecimiento de la eficiencia al aumentar las irradiancias observadas en la Figura 3.5 y en la Tabla 3.5. Además, se señala que la temperatura no tiene correlación directa con ninguna variable, sin embargo, tiene una correlación media con la potencia generada. Finalmente se muestra que la eficiencia tiene una correlación inversa con la potencia generada, por tanto, mientras aumenta la potencia generada, se tendrá una disminución de la eficiencia del panel solar.



**Figura 3.7** Rango de eficiencia para mejorar rendimiento. Fuente Propia.

En la Figura 3.7 se puede observar una gráfica de 3 variables donde se compara la eficiencia y la potencia para obtener un rango de irradiación donde se tiene la mayor generación de potencia y la mayor eficiencia del sistema. El rango de irradiación óptimo sería de aproximadamente 450 a 600 W/m<sup>2</sup>, pudiendo obtener eficiencias por encima de 18% y potencias mayores a 60W.

### Comparación panel solar flotante - convencional

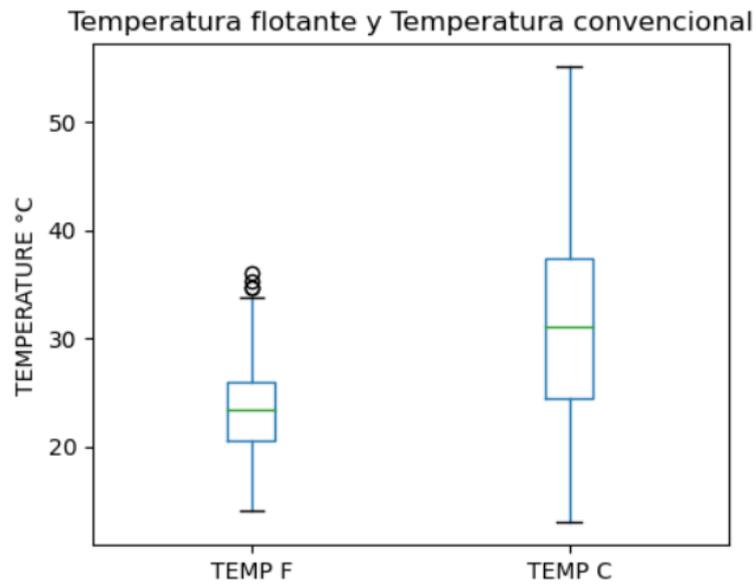
El desarrollo de esta campaña de mediciones del sistema fotovoltaico flotante fue realizado en conjunto a una campaña de mediciones de un sistema fotovoltaico convencional. Ambas experimentaciones fueron realizadas con las mismas condiciones ambientales y en el mismo tiempo. Los datos experimentales del sistema flotante pueden ser abordados accediendo al Anexo I. Los resultados de ambos sistemas se muestra continuación.

**Tabla 3.7** Comparación de potencia y eficiencia para ambos sistemas

Convencional		Flotante	
Potencia	Eficiencia	Potencia	Eficiencia
54,7	17,65	64,12	19,69

En la Tabla 3.6 se puede observar un aumento de generación de potencia del 17% del sistema flotante en relación con el sistema convencional y un aumento general del 2.04% en la eficiencia del sistema flotante. Estas características indican que se obtendrán

mayores registros de potencia con el sistema flotante y se aumentará la eficiencia del sistema.



**Figura 3.8** Gráfico de caja comparación de temperaturas

En la Figura 3.7 se muestra un gráfico de caja comparando las temperaturas del panel flotante y el panel convencional, evidenciando que la temperatura del panel flotante tiene un rango más pequeño y una media menor al panel en tierra. Siendo la media de la temperatura del panel convencional 31,39°C y 23,63°C en el panel flotante.

## 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

Se diseñó, implementó y realizó una campaña de mediciones experimentales de un sistema fotovoltaico flotante, instalando un sistema FPV en el reservorio de Cumbayá en Quito, Ecuador. Durante 23 días se recopilaron variables que permitieron analizar la generación de potencia fotovoltaica y la eficiencia del sistema. Se realizaron 6478 mediciones desde el 29/11/2023 hasta 21/12/2023 con observaciones cada 5 minutos y se realizó un tratamiento de datos detallado en la sección de metodología, con lo cual se redujo a 2390 observaciones de estudio, que al compararlas con un sistema fotovoltaico convencional sujeto a las mismas condiciones ambientales, demostraron una mejora de la eficiencia de alrededor del 2%.

El análisis de datos permitió observar que las potencias mayores al 75% de los datos (Q3, 86,77W) se encuentran en un rango de tiempo de nueve de la mañana hasta las cuatro de la tarde y que, a pesar de que la potencia aumenta con la irradiancia, la tasa de crecimiento de esta disminuye a partir de los 400W/m<sup>2</sup>. Esto indica que se pueden registrar potencias mayores a la media (64,12W) en al menos el 50% del tiempo de luz solar en el rango: 9am - 4PM. Además, la comparación del sistema convencional con el sistema flotante muestra que, bajo las mismas condiciones ambientales se obtiene una mayor generación de potencia en el sistema flotante. Si bien se sugiere que no existe relación entre la potencia y la temperatura del panel, al comparar la temperatura del sistema flotante con el sistema convencional, se demuestra que, al tener temperaturas más bajas, se tiene una mayor generación de potencia.

La recopilación de datos señala que el 50% de observaciones se mantienen dentro de un rango de eficiencia de 16.348% a 22.676%, un rango alto considerando la industria. Este gran valor de la eficiencia también es observado en el histograma de eficiencia donde la mayor cantidad de observaciones se encuentran cerca del 22%, esto se debe a que el 50% de observaciones de irradiancia son menores a 429.45 W/m<sup>2</sup>, donde se obtienen también valores mayores de eficiencia (los valores más altos se encuentran por debajo del rango inter-cuartil de la irradiancia). Al comparar la eficiencia vs irradiancia se puede aseverar que los valores más altos de eficiencia se encuentran en los rangos de menor irradiancia, por tanto, la eficiencia será mayor en rangos bajos y medios de irradiancia.

El análisis también indica que la media de la eficiencia es de 19.69%, un valor más cercano a las eficiencias convencionales, y que, comparándolo con los resultados del sistema convencional, señala una mejora del 2.04% en la eficiencia, lo que demuestra que, al

reducir la temperatura del panel solar, como se indica en la comparación de ambos sistemas, se tiene un aumento en la eficiencia promedio del sistema fotovoltaico.

Al realizar la matriz de correlaciones se observó que la eficiencia tiene una correlación negativa con la generación de potencia y la irradiancia, mostrando que se tendrá un desempeño más eficiente en rangos menores de irradiancia, sin embargo, la tabla de comportamiento de variables en IQR Irradiancia señala que dentro del rango de irradiancia (398,32 – 518,75) donde se encuentra la generación de potencia promedio (64,12), se tiene una eficiencia de 20,87%. Estos valores indican la existencia de un rango óptimo de trabajo, el cual es corroborado por el rango de eficiencia, donde se observa que en el rango 450 – 600 W/m<sup>2</sup>, el sistema presenta un mejor rendimiento, con observaciones de eficiencia y potencia mayores al promedio.

## **4.2 Recomendaciones**

Para verificar la relación entre la irradiancia y la eficiencia se puede realizar la toma de datos experimentales con un ambiente de laboratorio con irradiancia controlada, de esta manera poder observar el comportamiento de la eficiencia con la misma intensidad de luz solar. Además, al controlar las variables ambientales se podría modificar la temperatura ambiente para obtener resultados más específicos.

Se puede realizar una campaña de experimentación donde se obtengan los datos únicamente de carga de batería, sin descarga en el sistema. De esta forma se podrían comparar los resultados y las relaciones entre cada variable para identificar comportamientos claves de la potencia y la eficiencia.

Se puede realizar en paralelo una campaña de datos experimentales en dos espejos de agua para identificar si los resultados día a día son similares, considerando variables ambientales distintas. De esta forma identificar es similar para ambos sistemas.

## 5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. D. Colgan y M. Hinthorn, «International Energy Politics in an Age of Climate Change», *Annu. Rev. Polit. Sci.*, vol. 26, n.º 1, pp. 79-96, 2023, doi: 10.1146/annurev-polisci-051421-124241.
- [2] Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables, «Estadística Anual y Multianual 2022 DEL SECTOR ELÉCTRICO ECUATORIANO», *Estad. Anu. Multianual 2022 Sect. ELÉCTRICO Ecuat.*, pp. 22-63, 2023.
- [3] José Estuardo Jara Alvear, «Solar photovoltaic potential to complement hydropower in Ecuador: A GIS-based framework of analysis», 72-85.
- [4] Regents of the University of Colorado, «The Temperature Effect - Lesson», *TeachEngineering.org*, pp. 1-4, 2 de julio de 2019.
- [5] L. Liu, Q. Wang, H. Lin, H. Li, Q. Sun, y R. Wennersten, «Power Generation Efficiency and Prospects of Floating Photovoltaic Systems», *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 1136-1142, may 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.483.
- [6] World Bank Group, ESMAP, y SERIS, «Where Sun Meets Water: Floating Solar Market», World Bank, 2018. Accedido: 14 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/579941540407455831/pdf/Floating-Solar-Market-Report-Executive-Summary.pdf>
- [7] S. Vig y S. Kumar, «Analysis of temperature effect on PV panel», *Mater. Today Proc.*, p. S2214785323039391, jul. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.07.069.
- [8] H. Sainthiya, N. S. Beniwal, y N. Garg, «Efficiency Improvement of a Photovoltaic Module Using Front Surface Cooling Method in Summer and Winter Conditions», *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 140, n.º 6, p. 061009, dic. 2018, doi: 10.1115/1.4040238.
- [9] A. Dizier, «Techno-economic analysis of floating PV solar power plants using active cooling technique».
- [10] DNV, «DNV-RP-0584 Design, development and operation of floating solar photovoltaic systems». DNV GL AS, marzo de 2021. Accedido: 27 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.dnv.com/energy/standards-guidelines/dnv-rp-0584-design-development-and-operation-of-floating-solar-photovoltaic-systems.html>
- [11] Dave Jones, «European Electricity Review 2023», Ember, ene. 2023.
- [12] Juliet Davenport y Nick Wayth, «Statistical Review of World Energy». Accedido: 10 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.energyinst.org/statistical-review>
- [13] IEA Publications, «World Energy Outlook 2023», pp. 102-123, oct. 2023.
- [14] I. Daroen, «Risk Assessment of Offshore Floating Photovoltaic Systems: Methodology for Technological Risks», 2021, Accedido: 27 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Ad66919f1-9d88-4992-8130-9d9a07ab4f02>
- [15] J. Lim, «Repurposing Jack-ups, Semi-submersibles and Superbarges into Offshore and Nearshore Settlements», en *WCFS2019*, vol. 41, C. M. Wang, S. H. Lim, y Z. Y. Tay, Eds., en *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 41. , Singapore: Springer Singapore, 2020, pp. 19-47. doi: 10.1007/978-981-13-8743-2\_2.

- [16] H. Pourn, M. Padilha Campos Lopes, H. Ziar, D. Alves Castelo Branco, y Y. Sheng, «Evaluating floating photovoltaics (FPVs) potential in providing clean energy and supporting agricultural growth in Vietnam», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 169, p. 112925, nov. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112925.
- [17] M. R. Commission (MRC), «Hydropower Mekong». Accedido: 27 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mrcmekong.org/our-work/topics/hydropower/>
- [18] M. Rosa-Clot y G. M. Tina, «Chapter 2 - Current Status of FPV and Trends», en *Floating PV Plants*, M. Rosa-Clot y G. Marco Tina, Eds., Academic Press, 2020, pp. 9-18. doi: 10.1016/B978-0-12-817061-8.00002-6.
- [19] World Bank Group, ESMAP, y SERIS, «Where Sun Meets Water: Floating Solar Market», World Bank, 2018. Accedido: 14 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/579941540407455831/pdf/Floating-Solar-Market-Report-Executive-Summary.pdf>
- [20] A. Dizier, *Techno-economic analysis of floating PV solar power plants using active cooling technique : A case study for Taiwan*. 2018. Accedido: 27 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-244320>
- [21] V. Ramasamy y R. Margolis, «Floating Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2021 Installations on Artificial Water Bodies», NREL/TP-7A40-80695, 1828287, MainId:77479, oct. 2021. doi: 10.2172/1828287.
- [22] L. Liu, Q. Wang, H. Lin, H. Li, Q. Sun, y R. Wennersten, «Power Generation Efficiency and Prospects of Floating Photovoltaic Systems», *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 1136-1142, may 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.483.
- [23] Y. K. Choi, W. S. Choi, y J. H. Lee, «Empirical Research on the Efficiency of Floating PV Systems», *Sci. Adv. Mater.*, vol. 8, n.º 3, pp. 681-685, mar. 2016, doi: 10.1166/sam.2016.2529.
- [24] Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables, «Estadística Anual y Multianual 2022 DEL SECTOR ELÉCTRICO ECUATORIANO», *Estad. Anu. Multianual 2022 Sect. ELÉCTRICO Ecuat.*, p. 58, 2023.
- [25] Suri, Marcel *et al.*, «Global Photovoltaic Power Potential by Country», 149846, jun. 2020.
- [26] Ministerio de Energía y Minas de Ecuador, «PROYECTO HIDROELÉCTRICO "MAZAR DUDAS"», Ministerio de Energía y Minas. Accedido: 12 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.rekursyenergia.gob.ec/proyecto-hidroelectrico-mazar-dudas/>
- [27] CELEC EP, «» CELEC EP identifica 7 proyectos de generación fotovoltaica, de más de 1 580 megavatios pico». Accedido: 25 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.celec.gob.ec/celec-sur/uncategorized/celec-ep-identifica-7-proyectos-de-generacion-fotovoltaica-de-mas-de-1-580-megavatios-pico/>
- [28] J. H. M. Duran, «Incorporación de plantas fotovoltaicas flotantes en el embalse de la hidroeléctrica Manduriacu, Ecuador», mar. 2023, doi: 10.5281/ZENODO.7772889.
- [29] RoHS, «MPPT ML SERIES USER MANUAL». RoHS. Accedido: 18 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.srn solar.com/wp-content/uploads/2020/11/MPPT-Solar-Charge-Controller-ML2420N10-Instructions.pdf>