



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA ELECTRONICA



TESIS

**Estudio y diseño de sistemas fotovoltaicos flotantes para balsas de
regadío en el Perú**

Para optar el título profesional de
INGENIERO ELECTRÓNICO

Elaborado por:

Bach. Lozano Paz José Einstein

Bach. Sonapo Riveros Andy Jim

ASESOR:

Ing. Romero Cortez Oscar

ORCID: [0000-0002-7727-7900](https://orcid.org/0000-0002-7727-7900)

LAMBAYEQUE, PERÚ

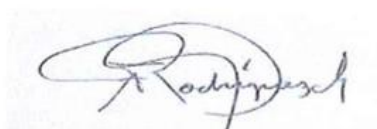
2025

UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

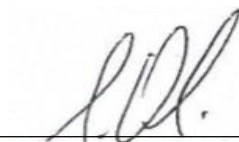
**Estudio y diseño de sistemas fotovoltaicos flotantes para balsas de
regadío en el Perú**

**Tesis para optar el título profesional de
INGENIERO ELECTRÓNICO**

Aprobado por el siguiente jurado:



M.Sc. Ing. Frank Richard Rodríguez Chirinos
PRESIDENTE



Mtro. Ing. Carlos Leonardo Oblitas Vera
SECRETARIO



Mg. Ing. Martín Augusto Nombera Lossio
VOCAL

LAMBAYEQUE, PERÚ

2025

UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

TESIS

**Estudio y diseño de sistemas fotovoltaicos flotantes para balsas de
regadío en el Perú**

Presentado por:



Bach. Lozano Paz José Einstein
TESISTA



Bach. Sonapo Riveros Andy Jim
TESISTA

Asesorado por:



Mg. Ing. Oscar Uchelly Romero Cortez.
ASESOR

LAMBAYEQUE, PERÚ

2025



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DECANATO

Ciudad Universitaria - Lambayeque

LICENCIADA - RESOLUCIÓN DEL CONSEJO DIRECTIVO N° 015 -2023-SUNEDU / CD



0058



ACTA DE SUSTENTACIÓN N° 31-2026-D/FACFyM

Siendo las 12:00 m del día 17 de marzo del 2026 se reunieron los miembros del jurado evaluador de la Tesis titulada:

ESTUDIO Y DISEÑO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS FLOTANTES PARA
BALSA DE REGADIO EN EL PERÚ

Designados por Resolución N° 009-2024 - D/FACFyM de fecha 08 de enero de 2024

Con la finalidad de evaluar y calificar la sustentación de la tesis antes mencionada, conformada por los siguientes docentes:

Dr. Ing. Frank Richard Rodríguez Chivinos

Presidente

Dr. Ing. Carlos Leonardo Oblitas Vana

Secretario

Mg. Ing. Martín Augusto Nomberto Cossio

Vocal

La tesis fue asesorada por (el) (la) Dr. Ing. Oscar Uchelly Romero Cortez, nombrado por Resolución N° 009-2024 - D/FACFyM de fecha 08 de enero de 2024

El Acto de Sustentación fue autorizado por Resolución N° 162-2026 - D/FACFyM de fecha 25 de febrero de 2026

La Tesis fue presentada y sustentada por (el) (los) Bachiller (es): Lotano Paz Jose Einstein y Senezo Riveros Andy Jim y tuvo una duración de 40 minutos.

Después de la sustentación, y absueltas las preguntas y observaciones de los miembros del jurado se procedió a la calificación respectiva, otorgándole el Calificativo de DIECISEIS (16) en la escala vigesimal, mención (BUENO).

Por lo que queda(n) apto(s) para obtener el Título Profesional de INGENIERO ELECTRÓNICO, de acuerdo con la Ley Universitaria 30220 y la normatividad vigente de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas y la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Siendo las 01:25 PM se dio por concluido el presente acto académico, dándose conformidad al presente acto con la firma de los miembros del jurado.

DR. ING. FRANK RICHARD RODRIGUEZ CHIVINOS
Presidente

Dr. Ing. Carlos Leonardo Oblitas Vana
Secretario

Mg. Ing. Martín Augusto Nomberto Cossio
Vocal

DR. Ing. Oscar Uchelly Romero Cortez
Asesor

CONSTANCIA DE VERIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD
(RESOLUCIÓN N° 626-2021-CU DEL 30 DE DICIEMBRE 2021)

Yo, Oscar Uchelly Romero Cortez, usuario revisor del documento titulado **ESTUDIO Y DISEÑO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS FLOTANTES PARA BALSAS DE REGADÍO EN EL PERÚ**. Cuyos autores son: **Bach. José Einstein Lozano Paz**, identificado con documento de identidad 45985225 y el **Bach. Andy Jim Sonapo Riveros**, identificado con documento de identidad 72731975; declaro que la evaluación realizada por el programa informático ha arrojado un porcentaje de similitud de 13%, verificable en el resumen de reporte automatizado de similitudes que se acompaña.

El suscrito analizó dicho reporte y concluyó que cada una de las coincidencias detectadas dentro del porcentaje de similitud permitido no constituyen plagio y que el documento cumple con la integridad científica y con las normas para el uso de citas y referencias establecidas en los protocolos respectivos.

Se cumple con adjuntar el Recibo Digital a efectos de la trazabilidad respectiva del proceso.

Lambayeque, 28 de Diciembre del 2025



Ing. Oscar Uchelly Romero Cortez

DNI: 41812294

Asesor

(Precisar si es docente, asesor, docente investigador, administrativo u otro)

Se adjunta:

*Resumen de Reporte automatizado de similitudes

*Recibo Digital

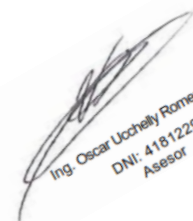
ESTUDIO Y DISEÑO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS FLOTANTES PARA BALSAS DE REGADÍO EN EL PERÚ

INFORME DE ORIGINALIDAD

13%	13%	2%	4%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.uss.edu.pe Fuente de Internet	3%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	3%
3	biblus.us.es Fuente de Internet	1%
4	repositorio.unprg.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	tesis.usat.edu.pe Fuente de Internet	1%
6	library.e.abb.com Fuente de Internet	<1%
7	Submitted to Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo Trabajo del estudiante	<1%
8	repositorio.uncp.edu.pe Fuente de Internet	<1%
9	repositorio.uancv.edu.pe Fuente de Internet	<1%
10	core.ac.uk Fuente de Internet	<1%
11	Submitted to Universidad Politécnica Estatal de Carchi	<1%


Ing. Oscar Uccelly Romero Cortez
DNI: 41612234
Asesor



Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Andy Sonapo Riveros
Título del ejercicio: Sistema de monitoreo para calcular el costo por consumo de ...
Título de la entrega: ESTUDIO Y DISEÑO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS FLOTANTE...
Nombre del archivo: 1.-Proyecto_de_Tesis_V1.0_-_Floating_PV_Systems_SONAPO_RI...
Tamaño del archivo: 36.41M
Total páginas: 114
Total de palabras: 16,893
Total de caracteres: 92,611
Fecha de entrega: 28-dic-2025 08:25p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 2851639113



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS



PROYECTO DE TESIS

ESTUDIO Y DISEÑO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS
FLOTANTES PARA BALSAS DE REGADÍO EN EL PERÚ

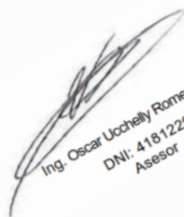
PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
ELECTRÓNICO

PRESENTADO POR:

Bach. Lozano Paz José Einstein
Bach. Sonapo Riveros Andy Jim

LAMBAYEQUE, PERÚ

2025


Ing. Oscar Uccelly Romero Cortez
DNI: 41812294
Asesor

Agradecimientos

A los docentes de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo de la facultad de ciencias físicas y matemáticas desde los primeros ciclos de carrera, quienes con su conocimiento y vocación fueron parte de nuestra formación académica y profesional. Gracias por incentivar el compromiso con la investigación, la ética y el servicio a nuestra sociedad

Los Autores.

Dedicatoria

Dedico este proyecto de tesis a mis padres por el apoyo incondicional, fueron la fuerza que me sostuvo en cada paso y vivencias en la etapa universitaria.

Los Autores.

Resumen

El presente trabajo de investigación denominado “Estudio y Diseño de Sistemas Fotovoltaicos Flotantes para Balsas de Regadío en Lambayeque” tuvo como objetivo general estudiar el potencial de instalar un sistema fotovoltaico sobre un cuerpo de agua, ya sea en balsas de regadío, reservorios o lagunas para el uso agrícola en Lambayeque. El investigador hizo uso de una metodología de tipo aplicada de enfoque mixto empleando como instrumentos de recolección de datos a la NASA, el NREL y METEONORM, así como, instrumento de análisis al programa System Advisor Model “SAM” y HELIOSCOPE. Además, se emplearon otros softwares de diseño, como el AUTOCAD para la realización de los planos. Como muestra de estudio se eligió los cuerpos de agua lenticos en la región Lambayeque. Los resultados obtenidos indicaron que, de los cuerpos de agua estudiados en el departamento, la planta de tratamiento de agua potable I es una opción viable para el diseño de un sistema fotovoltaico flotante, dado que, esta distribuye agua hacia las zonas agrícolas y se tiene conocimiento de la potencia de las electrobombas que funcionan en la planta. Para el diseño se seleccionó el módulo flotante Hydrelío de la compañía Ciel & Terrel y el módulo fotovoltaico de 380 W de la marca EAGLEPERC. El sistema tiene una potencia pico de 729.6 kW y una producción de energía anual de 1.17 GWh. Se concluyó que, es factible implementar un sistema fotovoltaico flotante en Lambayeque por su gran potencia energética para abastecer sistemas de bombeo y sistemas de regadío agrícolas.

Palabras clave: sistemas fotovoltaicos flotantes, potencial energético solar.

Abstract

The general objective of this research work called "Study and Design of Floating Photovoltaic Systems for Irrigation Ponds in Lambayeque" was to study the potential of installing a photovoltaic system on a body of water, whether in irrigation ponds, reservoirs or lagoons for agricultural use in Lambayeque. The researcher made use of an applied methodology with a mixed approach using NASA, NREL and METEONORM as data collection instruments, as well as the System Advisor Model "SAM" and HELIOSCOPE as analysis instruments. In addition, other design software, such as AUTOCAD, was used to create the plans. Lentic water bodies in the Lambayeque region were chosen as the study sample. The results obtained indicated that, of the water bodies studied in the department, the potable water treatment plant I is a viable option for the design of a floating photovoltaic system, since it distributes water to agricultural areas and the power of the electric pumps that operate in the plant is known. The Hydrelío floating module from Ciel & Terrel and the 380 W photovoltaic module from EAGLEPERC were selected for the design. The system has a peak power of 729.6 kW and an annual energy production of 1.17 GWh. It was concluded that it is feasible to implement a floating photovoltaic system in Lambayeque because of its high energy output to supply pumping systems and agricultural irrigation systems.

Keywords: floating photovoltaic systems, solar energy potential.

Índice

RESUMEN	¡Error! Marcador no definido.
ABSTRACT	¡Error! Marcador no definido.
INDICE DE TABLAS.....	¡Error! Marcador no definido.
INDICE DE FIGURAS	¡Error! Marcador no definido.
INFORMACION GENERAL	¡Error! Marcador no definido.
1 INTRODUCCIÓN.....	2
1.1 Síntesis de la situación problemática.....	2
1.2 Formulación del problema de investigación.....	4
1.3 Justificación	4
1.4 Objetivos de la investigación.....	6
1.4.1 Objetivo General.....	6
1.4.2 Objetivos Específicos	6
1.5 Hipótesis	6
2 DISEÑO TEORICO	7
2.1 Estado del Arte	7
2.1.1 Antecedentes Internacionales.....	7
2.1.2 Antecedentes Nacionales.	8
2.2 Radiación solar	8
2.2.1 Componentes de la radiación solar	9
2.3 Sistemas fotovoltaicos	10
2.4 Módulos fotovoltaicos	10
2.4.1 Módulo fotovoltaico monocristalino	10
2.4.2 Módulo fotovoltaico policristalino	11
2.4.3 Módulo fotovoltaico de película fina.....	12
2.4.4 Módulo fotovoltaico bifacial	12
2.5 Sistemas fotovoltaicos flotantes	13
2.5.1 Componentes de un Sistema fotovoltaico flotante	14
2.6 Cuerpos de agua	17

2.6.1	Cuerpos de agua lenticos	17
2.7	Sistema de bombeo solar	18
2.7.1	Carga estática	21
2.7.2	Abatimiento	21
2.7.3	Carga dinámica	21
3	MÉTODOS Y MATERIALES.....	22
3.1	Metodología.....	22
3.2	Población.	23
3.3	Muestra.	23
3.4	Instrumentos, equipos y materiales.	23
3.5	Consideraciones de diseño.....	24
3.5.1	Cuerpos disponibles para la instalación flotante.....	24
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
4.1	Resultados.....	25
4.1.1	Consideraciones geográficas y climáticas	25
4.1.2	Cuantificación de cuerpos de agua en Lambayeque	26
4.1.3	Radiación solar en la región Lambayeque	36
4.1.4	Parámetros de los cuerpos de agua (IH y Tm).....	36
4.1.5	Selección del lugar típico para el diseño.....	39
4.1.6	Diseño del Sistema Fotovoltaico Flotante	44
4.1.7	Electrónica de Potencia.....	62
4.1.8	Energía producida	70
4.1.9	Potencial Energético	77
4.2	Discusión	83
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	87
5.1	Conclusiones.....	87
5.2	Recomendaciones	88
	REFERENCIAS	90
	ANEXOS.....	96

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Diagrama de un sistema fotovoltaico para riego.</i>	3
Figura 2 <i>Módulos fotovoltaicos en la Laguna de Chullpía.</i>	8
Figura 3 <i>Componentes de la radiación solar</i>	9
Figura 4 <i>Módulo solar monocristalino</i>	11
Figura 5 <i>Módulo solar policristalino</i>	11
Figura 6 <i>Módulo solar de película delgada.</i>	12
Figura 7 <i>Paneles solares bifaciales</i>	13
Figura 8 <i>Esquema de sistema fotovoltaico flotante</i>	14
Figura 9 <i>Estructura flotante (pontones)</i>	15
Figura 10 <i>Sistema de anclaje cruzado hacia adentro</i>	16
Figura 11 <i>Sistemas de amarre para plantas fotovoltaicas flotantes.</i>	17
Figura 12 <i>Esquema de un sistema de bombeo fotovoltaico</i>	19
Figura 13 <i>Factores hidráulicos que intervienen en un sistema de bombeo de agua</i>	20
Figura 14 <i>Diagrama de metodología del diseño.</i>	22
Figura 15 <i>Mapa de Lambayeque.</i>	26
Figura 16 <i>Laguna Collique</i>	26
Figura 17 <i>Reservorio de Tinajones</i>	27
Figura 18 <i>Reservorio Boro</i>	29
Figura 19 <i>Reservorio de Capote</i>	30
Figura 20 <i>Lagunas de estabilización en la región Lambayeque.</i>	31
Figura 21 <i>Lagunas de estabilización de San José.</i>	32
Figura 22 <i>Lagunas de estabilización de San José.</i>	33
Figura 23 <i>Laguna de estabilización Pampa de Perros.</i>	34
Figura 24 <i>Planta de Tratamiento de Agua Potable del Departamento de Lambayeque.</i>	35
Figura 25 <i>Ciclo de Producción, Distribución, Recolección y Tratamiento.</i>	40
Figura 26 <i>Sistema de Abastecimiento de Agua Potable para Chiclayo.</i>	41
Figura 27 <i>Ciclo Operacional de Alcantarillado</i>	42
Figura 28 <i>Cámara de filtración seleccionada para el sistema fotovoltaico.</i>	43

Figura 29 Vista de la instalación fotovoltaica flotante con sistema Hydrelío.	45
Figura 30 Proceso de fijación de un operario para el sistema de amarre del módulo flotante.	46
Figura 31 Características Eléctricas del módulo fotovoltaico.	47
Figura 32 Configuraciones de los módulos fotovoltaicos en el sistema flotantes de acuerdo a su número de celdas.	48
Figura 33 Configuración típica de Layout.	49
Figura 34 Características técnicas del inversor.	51
Figura 35 Características técnicas de los string combiner type de la marca ABB.	52
Figura 36 Vista de las secciones en el plano del sistema fotovoltaico.	53
Figura 37 Vista de planta del sistema fotovoltaico flotante sobre el cuerpo de agua.	54
Figura 38 Accesorios que componen al combiner box.	55
Figura 39 Datos técnicos del portafusibles del string combiner.	57
Figura 40 Datos técnicos del fusible para el string combiner.	57
Figura 41 Conexión dentro del string combiner de la marca ABB.	58
Figura 42 Características técnicas del Busbar E90 PV.	59
Figura 43 Curva de potencia del módulo fotovoltaico de la marca Jinko Solar.	62
Figura 44 Diagrama de flujo para el modelo de conductancia incremental.	63
Figura 45 Diagrama de flujo para el modelo P&O.	65
Figura 46 Esquema para sistema de control de tensión mediante un único lazo de realimentación.	66
Figura 47 Esquema para sistema de control de tensión mediante doble lazo de realimentación.	67
Figura 48 Esquema de sistema de control de corriente.	67
Figura 49 Ubicación de los diodos de paso como elemento de un módulo fotovoltaico.	68
Figura 50 Esquema electrónico de un diodo de paso.	68
Figura 51 Esquemas típicos de colocación o instalación de diodos de paso en un módulo fotovoltaico: a) adyacente b) superposición	69
Figura 52 Configuración de los diodos de bloqueo en un módulo fotovoltaico.	70
Figura 53 Producción de Energía Mensual del Sistema Fovovoltaico.	71
Figura 54 Irradiancia promedio obtenida de los datos del NREL vs Potencia Generada.	72
Figura 55 Probabilidad de producir energía (P50/P90).	73
Figura 56 Producción mensual - HELIOSCOPE	74

Figura 57 <i>Pérdidas del Sistema - HELIOSCOPE</i>	74
Figura 58 <i>Producción Anual - HELIOSCOPE</i>	75
Figura 59 <i>Conjunto de Condiciones del Sistema Fotovoltaico - HELIOSCOPE</i>	76
Figura 60 <i>Cableado - HELIOSCOPE</i>	77
Figura 61 <i>Potencial Energético de los cuerpos de agua de la Región Lambayeque.</i>	81
Figura 62 <i>Potencial energético de los cuerpos de agua sin incluir el reservorio Tinajones.</i>	82

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Irradiación y temperatura en laguna Collique.</i>	36
Tabla 2 <i>Irradiación y temperatura en reservorio Tinajones.</i>	37
Tabla 3 <i>Irradiación y temperatura en Reservorio Boro.</i>	37
Tabla 4 <i>Irradiación y temperatura en Reservorio de Capote.</i>	38
Tabla 5 <i>Irradiación y temperatura en Laguna de Estabilizacion de San José.</i>	38
Tabla 6 <i>Irradiación y temperatura de laguna de Estabilización Pampa De Perro</i>	38
Tabla 7 <i>Irradiación y temperatura de la PTAP.</i>	39
Tabla 8 <i>Potencial Energético de Laguna de Collique</i>	77
Tabla 9 <i>Potencial Energético del Reservorio Tinajones.</i>	78
Tabla 10 <i>Potencial Energético del Reservorio de Boro</i>	78
Tabla 11 <i>Potencial Energético del Reservorio de Capote</i>	79
Tabla 12 <i>Potencial Energético de las Lagunas de Estabilización de San José</i>	79
Tabla 13 <i>Potencial Energético de las Lagunas de Estabilización de San Pampa Perro.</i>	80
Tabla 14 <i>Potencial Energético de la PTAP</i>	80
Tabla 15 <i>Cuadro Resumen del Potencial Energético del Departamento de Lambayeque.</i>	81

1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentarán las bases de la investigación, se elaborará la síntesis de la situación problemática y justificación, que nos permitirá la formulación del problema e hipótesis, y por último aclarar y elaborar los objetivos de la investigación.

1.1 Síntesis de la situación problemática

La agricultura es, desde el inicio de los tiempos, una actividad necesaria para la supervivencia de la especie humana por ser fuente de la mayor parte de los alimentos que se han consumido y se consumen actualmente en el mundo. Es una actividad económica también intensiva en recursos limitados como son la superficie terrestre, el agua y, también, la energía.

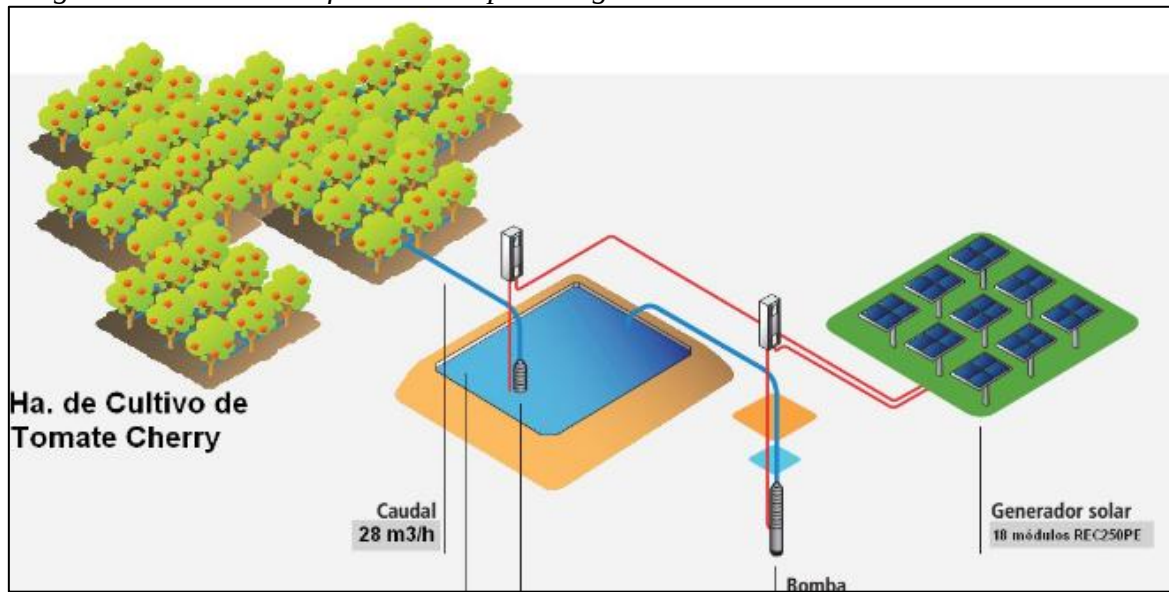
El Perú es un país en donde la agricultura es uno de los principales sectores de la economía. Peso a esto, según el censo del 2012, en el Perú se registra en la superficie agrícola no trabajada de 774 882 hectáreas, debido principalmente a la falta de agua que afecta en un 49%, y que es la razón de mayor importancia que impide el desarrollo de los cultivos y se da principalmente en la costa en 55%, en la sierra están afectadas el 32% y en la selva el 13%. (Informática, 2012)

Existen muchos poblados y localidades en nuestra región que, debido a su difícil acceso y ubicación, es complicado que la energía eléctrica y agua se extienda hacia ciertas comunidades lejanas, lo que significa una merma en el avance tecnológico y conlleva a un retraso si se compara con otras comunidades y mucho más con las ciudades que si cuentan con energía eléctrica. Por esta razón se hace imperativa la búsqueda de generación de energía eléctrica que se pueda obtener a partir de una fuente segura y confiable; mediante alternativo como, en el caso del presente diseño, la energía solar; el cual contribuiría a solucionar esta problemática de manera sostenible.

La energía solar es una fuente de energía limpia y renovable, idónea para ser utilizada en la producción de energía eléctrica para bombeo con fines agrícolas. Como se muestra en el esquema:

Figura 1

Diagrama de un sistema fotovoltaico para riego.



Fuente: Figueroa y Lard (2014)

Los sistemas de bombeo fotovoltaico ya han sido extensamente estudiados a nivel internacional y nacional. A partir de la experiencia en los sistemas de bombeo fotovoltaico instalados en el país ha salido a relucir un problema típico. Los sistemas de generación fotovoltaicos requieren de la utilización de una gran superficie para su instalación.

El requerimiento de espacio es una de las limitaciones para la instalación de sistemas de bombeo fotovoltaico, dependiendo de la tipología del panel solar y su eficiencia, se estima una relación de 1.6 Ha por cada MW de potencia (Menéndez Arroyo, 2018), por esta razón es de difícil acceso en algunas zonas aisladas con limitaciones de espacio. Una solución es aprovechar embalses, lagunas y ríos, para instalar en ellos sistemas fotovoltaicos. De esta manera, se pueden aprovechar los reservorios de agua e instalar módulos fotovoltaicos flotantes que utilizan la energía radiante para generar energía eléctrica capaz de abastecer a comunidades rurales, así como a la irrigación agrícola, y a la vez que se protegen las lagunas de la evaporación.

Pese a que en el Perú existen llanuras extensas de cultivo, una instalación de este tipo implica que, frente a una instalación fotovoltaica terrestre, se pueda aprovechar toda la superficie de una chacra determinada para el cultivo, mejorando la producción y también mejorando el desempeño económico de la misma.

Lambayeque es una región al noroeste del Perú, esta región tiene una amplia producción agrícola, “los cultivos predominantes son arroz, caña de azúcar y en menor medida están el maíz, hortalizas, las menestras y frutales de exportación” (Gobierno Regional Lambayeque, 2008).

En la región Lambayeque, el riego agrícola depende de un sistema integrado de captación, conducción, tratamiento y distribución de agua, en el que intervienen reservorios, canales y plantas de tratamiento operadas por EPSEL. Dicho sistema requiere un consumo constante de energía eléctrica para el funcionamiento de electrobombas y equipos asociados al transporte del recurso hídrico hacia las áreas de cultivo. Sin embargo, la mayor parte de esta demanda energética se cubre actualmente con suministro convencional de la red, lo que incrementa los costos operativos y limita la incorporación de soluciones más sostenibles.

En este contexto, los sistemas fotovoltaicos flotantes instalados sobre cuerpos de agua vinculados al sistema de distribución hidráulica representan una alternativa tecnológica para aprovechar la radiación solar disponible y reducir la dependencia de la red eléctrica en las etapas de bombeo y rebombeo. No obstante, en Lambayeque aún no se ha realizado un estudio detallado que cuantifique el potencial energético de este tipo de sistemas aplicado a cuerpos de agua artificiales utilizados dentro del ciclo de abastecimiento para riego agrícola. Por esta razón, los cuerpos de agua artificiales de las plantas de tratamiento constituyen reservorios válidos para el diseño fotovoltaico flotante, ya que abastecen las estaciones de bombeo que permiten el suministro para riego agrícola en la región.

1.2 Formulación del problema de investigación.

¿Cómo se puede estimar el potencial de generación eléctrica de un sistema fotovoltaico flotante instalado sobre cuerpos de agua utilizados dentro del sistema de distribución hidráulica para riego en la región Lambayeque?

1.3 Justificación

La agricultura es una de las actividades económicas más importantes de la región Lambayeque y depende fuertemente de la disponibilidad de agua y de la energía necesaria para su captación, tratamiento y distribución. El sistema de riego no solo se apoya en balsas de regadío rurales, sino también en reservorios y plantas de tratamiento de agua potable que, mediante estaciones de bombeo y rebombeo, permiten transportar el recurso

hídrico hacia zonas urbanas y agrícolas. En este esquema, la energía eléctrica constituye un insumo crítico y, al mismo tiempo, un factor de costo recurrente para las empresas operadoras y, de manera indirecta, para los usuarios vinculados al riego.

En paralelo, la región Lambayeque presenta niveles elevados de radiación solar a lo largo del año, lo que convierte a la energía solar en una alternativa técnica viable para cubrir parte de la demanda eléctrica asociada al sistema hidráulico. Los sistemas fotovoltaicos flotantes permiten aprovechar la superficie de cuerpos de agua existentes —como reservorios, lagunas artificiales o cámaras de plantas de tratamiento— para instalar módulos solares sin ocupar suelo agrícola útil. Además, al cubrir parcialmente la lámina de agua, contribuyen a reducir la evaporación y, por ende, ayudan a conservar el recurso hídrico disponible.

En el caso particular de Lambayeque, los cuerpos de agua gestionados por EPSEL, tales como reservorios y cámaras de filtración de las plantas de tratamiento, forman parte del ciclo de abastecimiento de agua que termina, directa o indirectamente, alimentando zonas de riego agrícola. Evaluar el diseño de un sistema fotovoltaico flotante sobre estos cuerpos de agua permite estimar su potencial de generación eléctrica para el accionamiento de electrobombas y equipos auxiliares, lo que se traduce en una reducción esperada del consumo de energía de la red y en una mayor sostenibilidad del sistema de distribución.

Desde el punto de vista académico y tecnológico, la investigación aporta un estudio sistemático sobre la selección del cuerpo de agua, la caracterización del recurso solar, el dimensionamiento del sistema fotovoltaico flotante y la estimación de la energía generada, utilizando herramientas especializadas como SAM y HELIOSCOPE. Este tipo de análisis es escaso en el contexto nacional, especialmente aplicado a cuerpos de agua artificiales vinculados al ciclo de abastecimiento para riego.

Finalmente, el trabajo se justifica porque ofrece una propuesta de diseño replicable para otras infraestructuras hidráulicas de la región y del país, demostrando que es posible integrar sistemas fotovoltaicos flotantes al esquema actual de distribución de agua. De esta manera, se contribuye a la incorporación progresiva de energías renovables en el sector hídrico y, de forma indirecta, al fortalecimiento de la seguridad hídrica y del riego agrícola en Lambayeque.

1.4 Objetivos de la investigación

1.4.1 Objetivo General

Estimar el potencial de generación energética mediante el diseño de un sistema fotovoltaico flotante sobre cuerpos de agua utilizados dentro del sistema de distribución hidráulica para riego agrícola en Lambayeque.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar los cuerpos de agua utilizados dentro del sistema de abastecimiento y distribución hidráulica en Lambayeque, identificando sus dimensiones, condiciones físicas y disponibilidad para la instalación de sistemas fotovoltaicos flotantes.
- Evaluar la radiación solar y los parámetros ambientales necesarios para el diseño fotovoltaico flotante, utilizando información disponible a nivel local y fuentes especializadas.
- Diseñar y dimensionar un sistema fotovoltaico flotante típico para el cuerpo de agua seleccionado, considerando módulos, cables, anclajes, flotadores, inversores y banco de baterías.
- Calcular la energía generada anualmente por el sistema fotovoltaico flotante mediante herramientas de simulación, validando el desempeño técnico esperado.
- Estimar el potencial energético regional derivado de la instalación de sistemas fotovoltaicos flotantes en cuerpos de agua vinculados a la distribución hidráulica utilizada en el riego agrícola.

1.5 Hipótesis

El diseño de un sistema fotovoltaico flotante sobre cuerpos de agua vinculados al sistema de distribución hidráulica permitirá estimar el potencial de generación eléctrica aprovechable para aplicaciones de bombeo y suministro de agua utilizadas en el riego agrícola en Lambayeque.

2 DISEÑO TEORICO

2.1 Estado del Arte

2.1.1 Antecedentes Internacionales

En **Diseño de una instalación fotovoltaica flotante para balsas de regadío** (Menéndez, 2018), en España, se diseñó un sistema fotovoltaico flotante en una balsa de riego con una amplitud de 600 Ha para suministrar de energía eléctrica al equipo de bombeo del sistema de regadío de una plantación agrícola. Para esta tesis, primero se realizó un análisis teórico del estado del arte de los distintos tipos de sistemas fotovoltaicos flotantes en el mundo, así como la evaluación de la superficie en donde se van a instalar y los niveles de radiación solar en la zona. Luego se realizó el cálculo de la potencia de diseño, cuyo valor es de 939 kWp, el número de paneles necesarios y la selección de los componentes a utilizar. Una vez definido los parámetros anteriores se realizó el cálculo del rendimiento de la instalación y el estudio de viabilidad económica para conocer la rentabilidad financiera de la inversión del proyecto.

En **Diseño de sistemas fotovoltaicos flotantes de desalación y bombeo para regadío** (Alarcón Olsson, 2019) en Cartagena, España se realizó el estudio de un sistema fotovoltaico flotante para generar energía y utilizarla en zonas con recursos limitados de electricidad. Primero, se desarrolló una descripción de los sistemas fotovoltaicos flotantes, luego se determinó las condiciones a las que están sometidos los paneles fotovoltaicos, recolectando la información de irradiación solar mediante el uso de PVGIS. Finalmente se realizó el cálculo la potencia de la planta y se obtuvo la energía total de 82.752,46MWh/año, y se concluyó con optar por conectar a la planta desalinizadora debido a su rentabilidad que posee.

En **Design parameters of 10 kW floating solar power plant** (Sharma et al, 2015) se mencionó la importancia de comprender los detalles de construcción; así como los diversos componentes al momento del diseño de una planta solar flotante, como el inversor, la estructura de montaje del módulo, cables y conectores, la disposición de amarre, y la plataforma flotante. Al final del estudio se concluyó que al utilizar estos sistemas fotovoltaicos flotantes se logra disminuir las pérdidas de calor que se producen durante su funcionamiento; a la par que al estar cubierto por estos dispositivos ayudan a reducir la evaporación del agua hasta en un 70%.

En **Floating Photovoltaic Systems: Assessing the Technical Potential of Photovoltaic Systems on Man-Made Water Bodies in the Continental United States** (Spencer et al, 2019) se desarrolló un modelo de geo procesamiento utilizando herramientas de código abierto como Python y QGIS. Así lograron cuantificar los cuerpos de agua artificiales con ayuda del Inventario Nacional de Represas, posterior a ello analizaron y clasificaron cuales cuerpos de agua están disponibles para la aplicación. Luego se calculó las pérdidas de evaporación por mes. Finalmente se evaluó el potencial de generación de los sistemas fotovoltaicos flotantes y se estimó que se podría desarrollar 2116 GW en los Estados Unidos, capaz de ocupar el 9.6% de la generación eléctrica actual.

2.1.2 Antecedentes Nacionales.

En el Perú solo existe un proyecto relacionado a la utilización de sistemas fotovoltaicos flotantes. Juan Sergio Castro en conjunto con la comunidad de Chullpía, aprovecharon la laguna de Chullpía en Puno, para instalar un módulo fotovoltaico flotante que provee energía a un motor para llenar los reservorios aledaños a la laguna. Esta instalación cuenta con 34 paneles fotovoltaicos apoyados en una estructura de metal y cauchos reciclados.

Figura 2
Módulos fotovoltaicos en la Laguna de Chullpía.



Fuente: AUTOSOLAR (2019)

2.2 Radiación solar

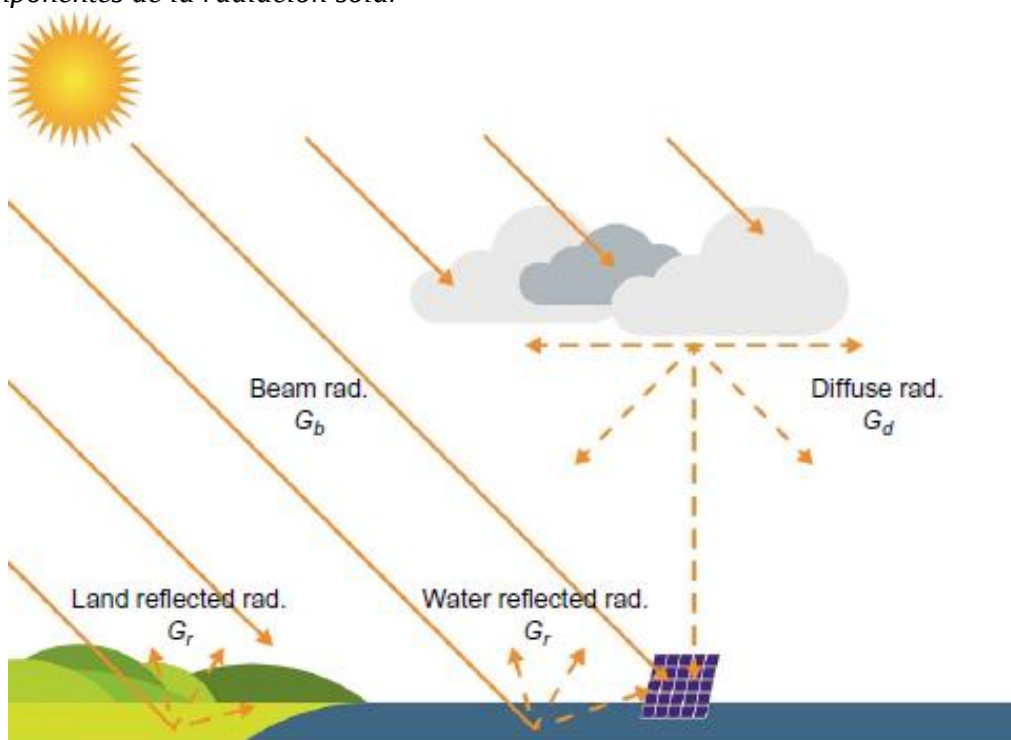
“La unidad de medida de la radiación solar es en kilowatt hora por metro cuadrado (kWh/m²); esta es una unidad de energía y no de potencia” (Jara Ramos & Ramos Carbajal, 2018, pág. 21).

En el Perú la mayor incidencia de niveles de radiación solar la tiene la zona sur (ver anexo 1) como son las regiones de Tacna, Moquegua, Arequipa, Ayacucho y Apurímac, donde se sitúan las 7 centrales solares existentes en el Perú.

2.2.1 Componentes de la radiación solar

La radiación del sol atraviesa la atmósfera y las nubes, esto hace que no llegue directamente al suelo, esto hace que con la variación y las condiciones climáticas los efectos de la atmósfera en la dispersión y absorción de la radiación se vean afectadas a cambios. En la siguiente imagen se muestra los componentes actuantes de la radiación solar en sistemas fotovoltaicos flotantes.

Figura 3
Componentes de la radiación solar



Fuente: Clot y Tina (2018)

El componente reflejado G_r , es el que rebota del suelo u otras superficies como el agua, el haz de radiación G_b es la radiación directa, esta pasa en la línea recta a través de la atmósfera hasta el suelo y la radiación difusa G_d es la dispersada por la atmósfera y nubes. (Rosa-Clot & Marco Tina, 2018)

Estos tres componentes: G_b , G_r y G_d inciden en el módulo fotovoltaico e intervienen en el momento de definir un modelo matemático para el cálculo de la radiación.

2.3 Sistemas fotovoltaicos

Un sistema fotovoltaico abarca el uso de cualquier sistema que presente un efecto fotovoltaico, es decir la conversión de energía solar a energía eléctrica. Los sistemas fotovoltaicos se pueden clasificar en sistemas On grid y Off grid (Rosa-Clot & Marco Tina, 2018), el primero se refiere a sistemas conectados a la red eléctrica y los sistemas Off grid son sistemas fuera de la red y su uso primordial es para zonas aisladas donde hay ausencia de subestaciones de electricidad.

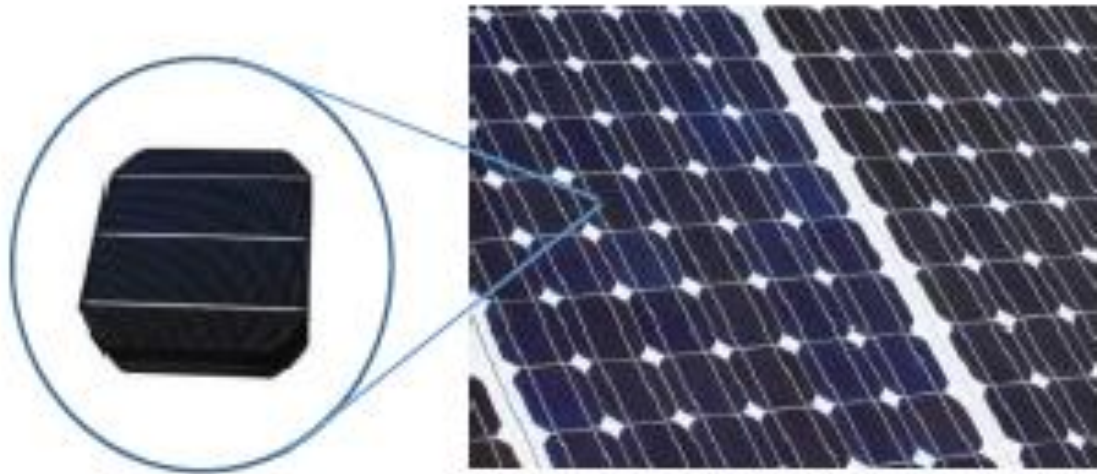
El Sistema fotovoltaico terrestre es la aplicación más común, se instalan en lugares donde existe disponibilidad de espacio. Hasta el momento en el Perú existen 7 plantas solares, siendo estas de este tipo de sistema.

2.4 Módulos fotovoltaicos

2.4.1 Módulo fotovoltaico monocristalino

Este tipo de módulo presenta una estructura uniforme, se fabrica de silicio con un porcentaje alto de pureza. Se caracteriza por poseer una forma recortada en los bordes y también por tener una mayor eficiencia que las celdas de tipo policristalino.

Figura 4
Módulo solar monocristalino



Fuente: Huamán (2018)

2.4.2 Módulo fotovoltaico policristalino

El módulo fotovoltaico de tipo policristalino está compuesto por varias celdas cristalizadas de silicio fundido, una característica fundamental es la forma cuadrada que poseen. Estos tipos de paneles presentan un menor desempeño a comparación de los módulos monocristalinos, sin embargo, poseen un menor precio que conlleva a una menor inversión y menor costo económico de instalación (Menéndez, 2018).

Figura 5
Módulo solar policristalino



Fuente: Huamán (2018)

2.4.3 Módulo fotovoltaico de película fina

Son módulos fabricados de películas de silicio, cadmio o cobre, estos más fáciles de fabricar y producir ya que se necesita menos material para su producción. Este tipo de panel tiene la característica de ser más flexibles, pero el problema es que necesita más espacio que otros paneles, por el cual no se recomienda el uso en instalaciones residenciales; este panel se usa principalmente en centrales solares donde se disponga de mucho espacio (Martín Delgado, 2020).

Figura 6

Módulo solar de película delgada.



Fuente: INDIAMART (2021)

2.4.4 Módulo fotovoltaico bifacial

Estos módulos producen energía a partir de ambos lados, esto hace que presente una mayor generación de energía. Suelen tener un mayor tiempo de vida debido a que son resistentes a los rayos ultravioletas, Algunos fabricantes mencionan que este tipo de paneles ofrecen un aumento en la producción de energía del 30% solo con la energía que incide en la parte trasera (Tartaglia, 2019).

Figura 7

Paneles solares bifaciales



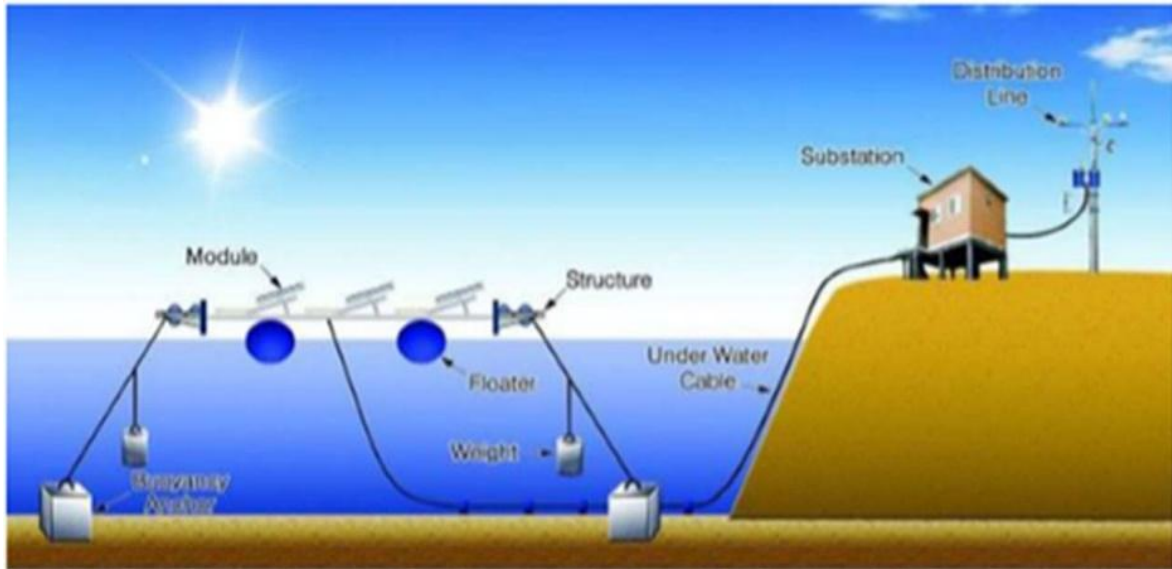
Fuente: TRACESOFTWARE (2021)

2.5 Sistemas fotovoltaicos flotantes

Está conformado por matrices fotovoltaicas convencionales que se benefician de los cuerpos de agua adyacentes para evitar su sobrecalentamiento y generar energía, su diseño es variado y depende del tamaño de la instalación y de las características – tamaño, profundidad, condiciones meteorológicas del embalse o en este caso de la balsa de regadío donde se ubica el sistema fotovoltaico flotante. Sus estructuras flotantes se instalan en lagunas o embalses utilizados mayormente para fines de riego (Trapani & Santafé, 2014). Un esquema del mismo se muestra en la figura siguiente:

Figura 8

Esquema de sistema fotovoltaico flotante



Fuente: Kwan y Geun (2014)

2.5.1 Componentes de un Sistema fotovoltaico flotante

Inversores:

Este dispositivo es necesario para convertir la corriente continua en corriente alterna, también permite sincronizar la instalación con la red, generando una calidad de energía que se demande. Los parámetros principales que actúan en un inversor son los siguientes:

Tensión nominal (V), Potencia Nominal (VA), Potencia activa (W), Capacidad de sobrecarga y Rendimiento (Figuerola Ortiz et al, 2018).

Pontones:

Es la plataforma flotante que se encarga de proveer la flotabilidad y estabilidad del sistema generador de electricidad. Usualmente son hechos de Polietileno de densidad media (Santafé et al, 2014).

Figura 9

Estructura flotante (pontones)



Fuente: QSE-SOLAR (2021)

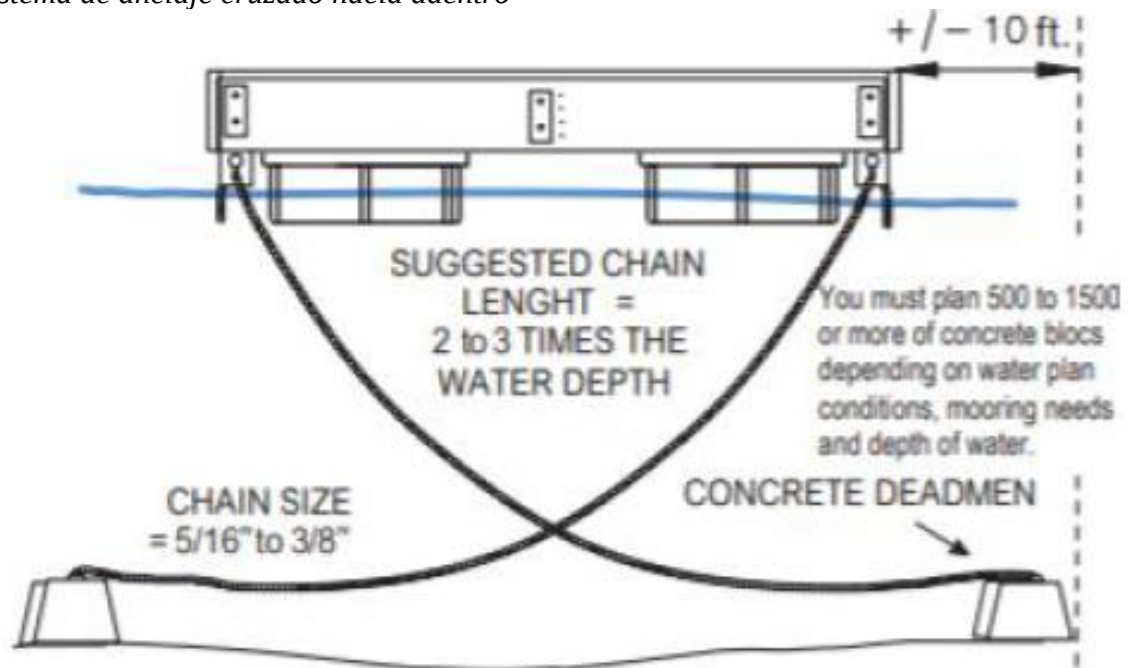
El fabricante que ha tenido mayor innovación en el mercado de diseño de sistemas fotovoltaicos flotantes es la compañía Ciel et terre, cuenta con productos llamados Hydrelío, que es una tecnología perfeccionada de flotadores especializados en esta aplicación, tienen como característica ser de tipo lego, de material HDPE reciclable y presentan una alta resistencia a vientos, lluvias y nieve (CIEL-TERRE, 2020).

Sistema de anclaje:

Los sistemas de anclaje son fundamentales en sistemas fotovoltaicos flotantes, ayuda a tener una fijación mediante un anclaje, los objetos a fijar pueden ser la tierra, postes o algo en el entorno que permanecerá fijo. Investigadores afirman que la mejor opción es anclar la estructura flotante hacia abajo y anclar otro punto en un lado a fin de evitar que la estructura gire.

Figura 10

Sistema de anclaje cruzado hacia adentro



Fuente: Martin Delgado (2020)

Acoplamiento flexible:

“Correas de goma o polietileno, su función es hacer que los pontones puedan moverse entre sí para que el sistema pueda adaptarse a diferentes niveles de agua” (Santafé et al., 2014).

Amarre para planta fija:

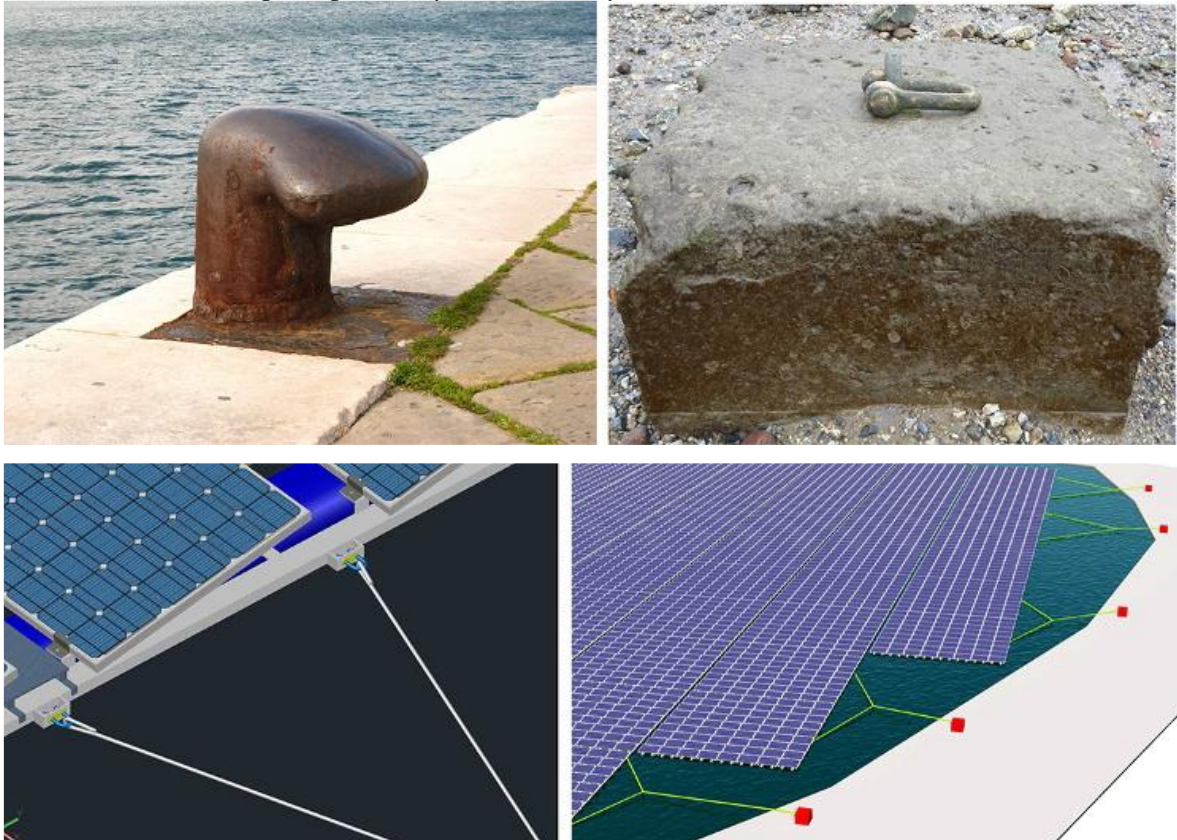
Para conocer qué tipo de amarre se necesita en una planta fotovoltaica flotante se debe saber si la planta es fija o con seguimiento. Para definir este tipo de amarre se debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Profundidad del cuerpo de agua
- Cambio de nivel de agua
- Estructura del fondo del cuerpo de agua

Una vez definido los aspectos anteriores, se puede fijar los bloques de amarre a utilizar.

Figura 11

Sistemas de amarre para plantas fotovoltaicas flotantes.



Fuente: Clot y Tina (2018)

2.6 Cuerpos de agua

Son aquellas superficies con extensión sobre superficie terrestre o subsuelo, estos abarcan toda extensión donde exista agua. Se clasifican de la siguiente manera:

2.6.1 Cuerpos de agua lenticos

Son aquellos cuerpos de agua en donde el agua permanece quieta o fluyendo de manera muy lenta. Los lagos y lagunas pertenecen a este tipo, son de gran importancia como fuente de abastecimiento poblacional y también como uso productivo (LIFEDER, 2021).

2.6.1.1 Características de las aguas lénticas

Cuentan con tres niveles, siendo estas la zona litoral, zona limnética y zona profunda.

Zona litoral:

Es una zona con mayor biodiversidad de todos los cuerpos de agua lénticas, está conformada por la orilla y parte del fondo siempre que este permanezca expuesto a una cantidad de luz solar, debido a esto numerosas especies hacen vida en esta zona.

Zona limnética:

Es aquella zona donde el centro de la masa de agua está alejado de las orillas, hasta la profundidad de la zona de compensación, es la zona con la mayor existencia de peces, es el semejante al mar abierto.

Zona profunda:

Es la zona donde el cuerpo de agua está ubicado en el fondo, donde no llega la luz del sol, en esta zona se dificulta la visibilidad y solo algunos seres vivos como peces y moluscos lo habitan (LIFEDER, 2021).

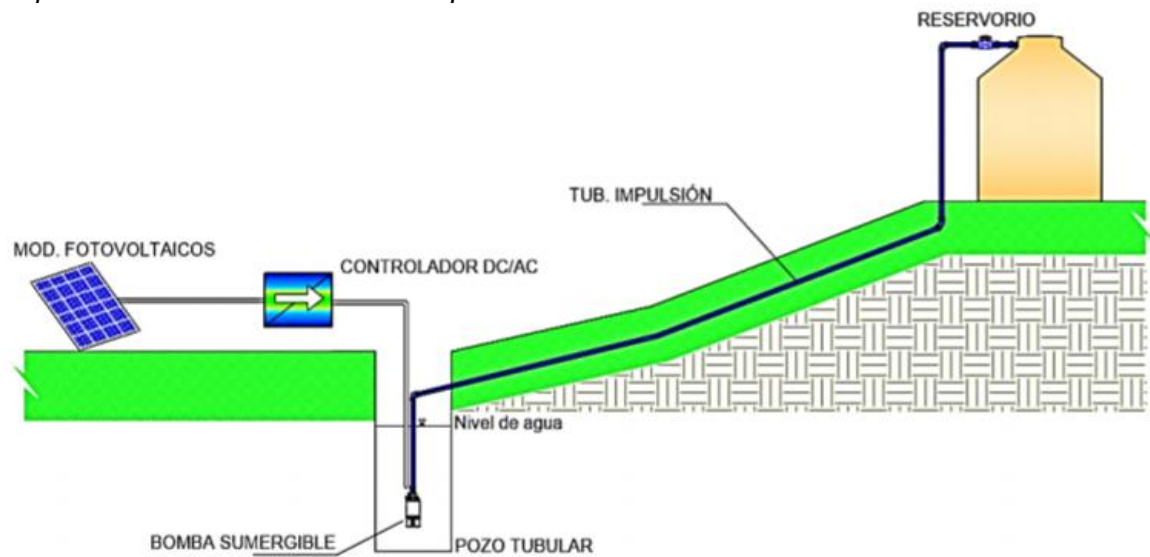
2.7 Sistema de bombeo solar

Las estaciones de bombeo son un grupo conformados por tuberías y accesorios, equipos y estructuras civiles que se encargan de impulsar el agua desde un reservorio o cuerpo de agua para abastecer al riego agrícola u otra actividad.

El sistema de bombeo fotovoltaico se encarga de utilizar como fuente de energía, la captación de energía solar mediante paneles fotovoltaicos para el funcionamiento de la bomba, así mismo este sistema es abastecido mediante un reservorio o balsa que mediante tuberías a presiones mínimas se desplazara el agua a fin de usarlo en aplicaciones ya mencionadas (Zambrano Cueva, 2020).

Figura 12

Esquema de un sistema de bombeo fotovoltaico



Fuente: Zambrano Cueva (2020)

Se presenta como una aplicación con un gran potencial de desarrollo en el futuro, tiene especial impacto en zonas rurales donde no hay presencia de energía eléctrica convencional.

Las aplicaciones más comunes son:

- Riego agrícola.
- Abastecimiento para zonas rurales.

Para dimensionar un sistema de bombeo solar se debe entender los conceptos básicos que definen las condiciones de trabajo de una obra.

Conocer la Carga Dinámica Total (CDT) y el volumen diario necesario nos ayuda a dimensionar el sistema fotovoltaico, debido a que los productos de ambos mantienen una relación directa con el tamaño del sistema.

La Carga dinámica total se expresa de la siguiente manera:

$$CDT = CE + CD \dots (1)$$

$$CDT = (\text{Nivel estático} + \text{altura de descarga}) + (\text{abatimiento} + \text{fricción}) \dots (2)$$

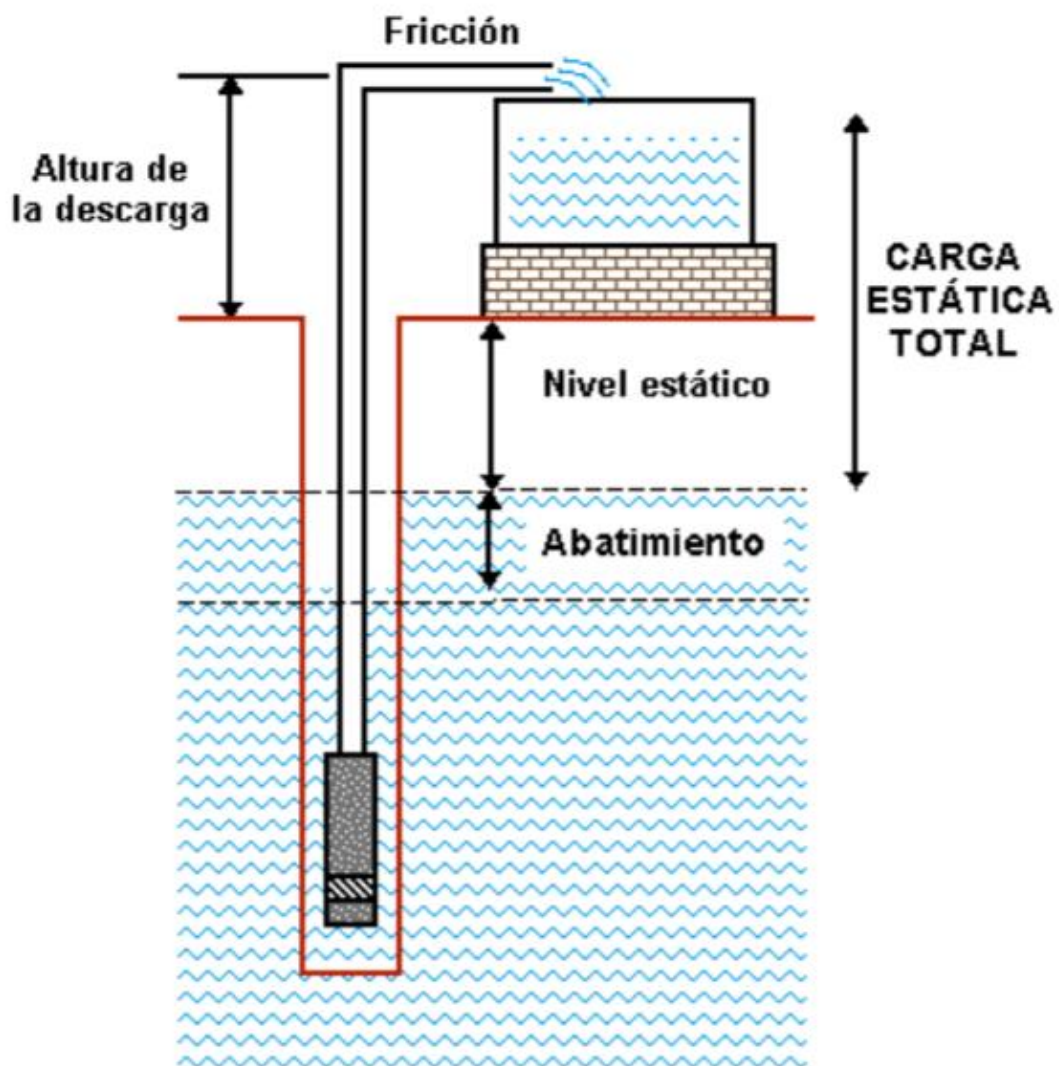
Donde:

CE: Carga estática

CD: Carga dinámica

Figura 13

Factores hidráulicos que intervienen en un sistema de bombeo de agua



Fuente: SANDIA NATIONAL LABORATORIES (2018)

2.7.1 Carga estática

Es la distancia entre el nivel de agua antes del abatimiento hasta la altura final donde se descarga el agua.

2.7.2 Abatimiento

Es un fenómeno usual que ocurre cuando se bombea agua. Esta baja con la constante extracción del nivel del agua.

2.7.3 Carga dinámica

Se define como el aumento de la presión a causa de la resistencia al flujo al agua, por factores como la rugosidad de las tuberías y accesorios (Sandia National Laboratories).

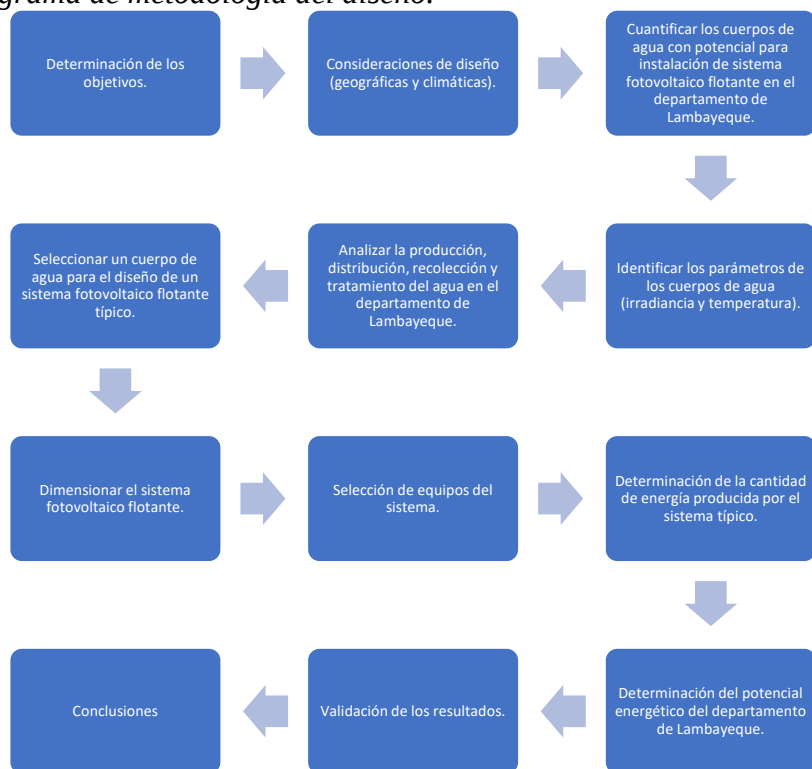
3 MÉTODOS Y MATERIALES

3.1 Metodología

La investigación se desarrolló como un estudio tecnológico de carácter descriptivo y de diseño, orientado a estimar el potencial de generación energética de un sistema fotovoltaico flotante instalado sobre cuerpos de agua vinculados al sistema de distribución hidráulica para riego en Lambayeque. No se realizaron mediciones experimentales sobre cultivos ni análisis de rendimiento agrícola, dado que el propósito central fue el dimensionamiento y la simulación técnica del sistema fotovoltaico flotante. La metodología se estructuró sobre la caracterización de los cuerpos de agua disponibles, la evaluación de la radiación solar, el diseño del sistema flotante y la simulación energética con herramientas especializadas. Para el tratamiento de datos se recurrió a fuentes secundarias confiables, tales como bases de datos de radiación solar del NREL y NASA, así como información técnica de EPSEL y publicaciones académicas relacionadas con sistemas fotovoltaicos flotantes. La información fue procesada con los programas SAM y Helioscope para validar la potencia instalada, el desempeño del sistema y la energía producida anualmente.

Figura 14

Diagrama de metodología del diseño.



Fuente: Elaboración propia.

3.2 Población

La población estuvo constituida por los cuerpos de agua lenticos ubicados en la región Lambayeque que forman parte del sistema de abastecimiento y distribución hidráulica utilizado directa o indirectamente en actividades agrícolas. Entre estos cuerpos se incluyen reservorios, lagunas artificiales y cámaras de plantas de tratamiento operadas por EPSEL.

3.3 Muestra

La muestra correspondió al cuerpo de agua seleccionado para el diseño del sistema fotovoltaico flotante, el cual fue escogido considerando profundidad, estabilidad, accesibilidad y potencial de conexión eléctrica. Después de comparar diferentes opciones, la Planta de Tratamiento de Agua Potable I de Lambayeque resultó la más adecuada debido a que abastece sistemas de bombeo vinculados a la distribución de agua, y opera de manera continua, permitiendo estimar el desempeño del sistema fotovoltaico flotante bajo condiciones reales de operación hidráulica.

3.4 Instrumentos, equipos y materiales.

Para la simulación y análisis energético se utilizaron herramientas de software especializadas, entre ellas el System Advisor Model (SAM) del NREL, Helioscope y Autocad para el diseño del arreglo flotante y la elaboración de planos. Adicionalmente, se recurrió a bases de datos oficiales de radiación solar (NASA y NREL), fichas técnicas de los módulos fotovoltaicos y flotadores, así como información operacional proporcionada por EPSEL para el dimensionamiento preliminar.

- GOOGLE MAPS
- GOOGLE EARTH
- Microsoft Excel
- AUTOCAD
- System Advisor Model (SAM) y HELIOSCOPE
- Cartas Nacionales del Instituto Geográfico Nacional.
- Submerged and Floating Photovoltaic Systems: Modelling, Design and Case Studies. Rosa-Clot, M., & Tina, G. M. (2017).

- Where Sun Meets Water: Floating Solar Handbook for Practitioners, Energy Sector Management Assistance Program, & Solar Energy Research Institute of Singapore. (2019).

3.5 Consideraciones de diseño

El diseño del sistema consideró la geometría del cuerpo de agua, la capacidad de flotación, la orientación, el espaciamiento entre módulos, el sistema de anclaje, los requerimientos eléctricos y la estructura de integración con los equipos de bombeo. Los parámetros fueron adaptados para operar bajo condiciones reales de radiación solar en Lambayeque y minimizando el uso de suelo agrícola.

3.5.1 Cuerpos disponibles para la instalación flotante

Los cuerpos de agua revisados incluían reservorios, lagunas artificiales y cámaras de plantas de tratamiento, todos ellos vinculados al sistema de abastecimiento para zonas agrícolas y urbanas. Estos cuerpos constituyeron la base para la identificación del sitio más conveniente para el diseño del sistema fotovoltaico flotante, priorizando condiciones físicas adecuadas, seguridad operativa y facilidad de acceso para instalación y mantenimiento.

Entre los cuerpos considerados dentro de la región Lambayeque tenemos los siguientes:

1. Laguna de Collique.
2. Reservorio Tinajones.
3. Reservorio Boro.
4. Reservorio de Capote.
5. Lagunas de estabilización de San José.
6. Laguna de estabilización Pampa de Perros.
7. Cámaras de la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Lambayeque.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados

En esta parte se exponen los resultados obtenidos del análisis del recurso solar en cada cuerpo de agua, considerando que el sistema fotovoltaico funciona en todo el año. Después, se diseñará un sistema fotovoltaico flotante para una de los cuerpos de agua, tomando en consideración las ventajas que posee la instalación de estos sistemas. Finalmente, se seleccionarán los equipos que conformarán el sistema eléctrico.

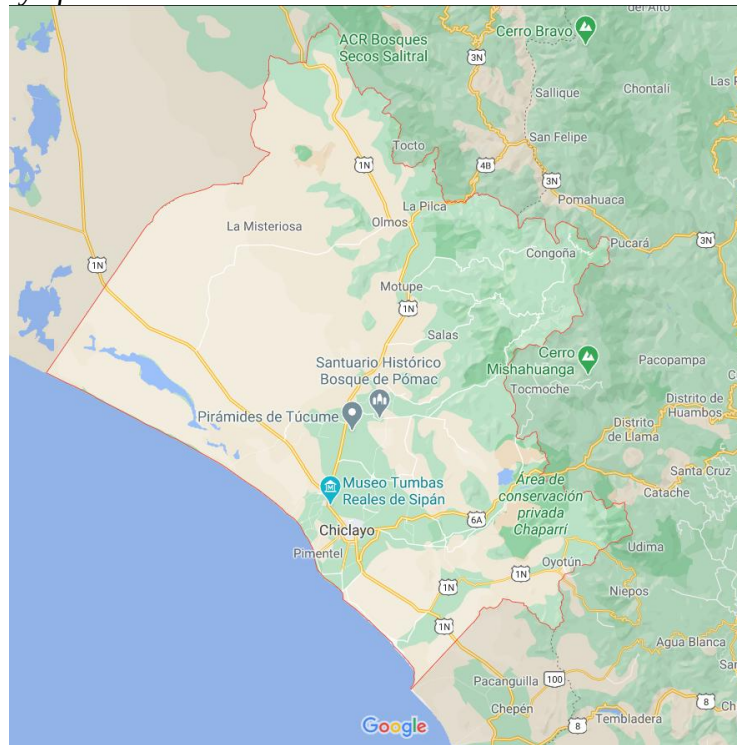
4.1.1 Consideraciones geográficas y climáticas

La región Lambayeque presenta niveles elevados de radiación solar a lo largo del año, con valores que permiten dimensionar un sistema fotovoltaico flotante con alta productividad energética. Los datos utilizados para el análisis fueron obtenidos a partir de fuentes reconocidas, tales como el NREL y la NASA, asegurando confiabilidad en la estimación de irradiancia global y temperatura de operación. Estos parámetros fueron necesarios para calcular el desempeño del sistema y su energía anual generada, sin requerir mediciones experimentales de campo.

Las características climáticas y geográficas serán consideradas en la ciudad de Lambayeque, teniendo las siguientes características:

- La región Lambayeque se ubica en la zona costa del Perú, el territorio se caracteriza por presentar extensos desiertos y tablazos aledaños al mar. Sus coordenadas geográficas se ubican entre $-5^{\circ} 28'$ y $-7^{\circ} 10' 27''$ de latitud y entre $-79^{\circ} 53' 48''$ y $-80^{\circ} 37' 24''$ de longitud.
- Generalmente en el verano alcanza una temperatura de 34°C , para el resto del año presenta un clima otoñal con vientos y temperaturas que varían entre los 17° y 25°C (Municipalidad Provincial de Lambayeque, 2021).

Figura 15
Mapa de Lambayeque.



Fuente: Google Maps.

4.1.2 Cuantificación de cuerpos de agua en Lambayeque

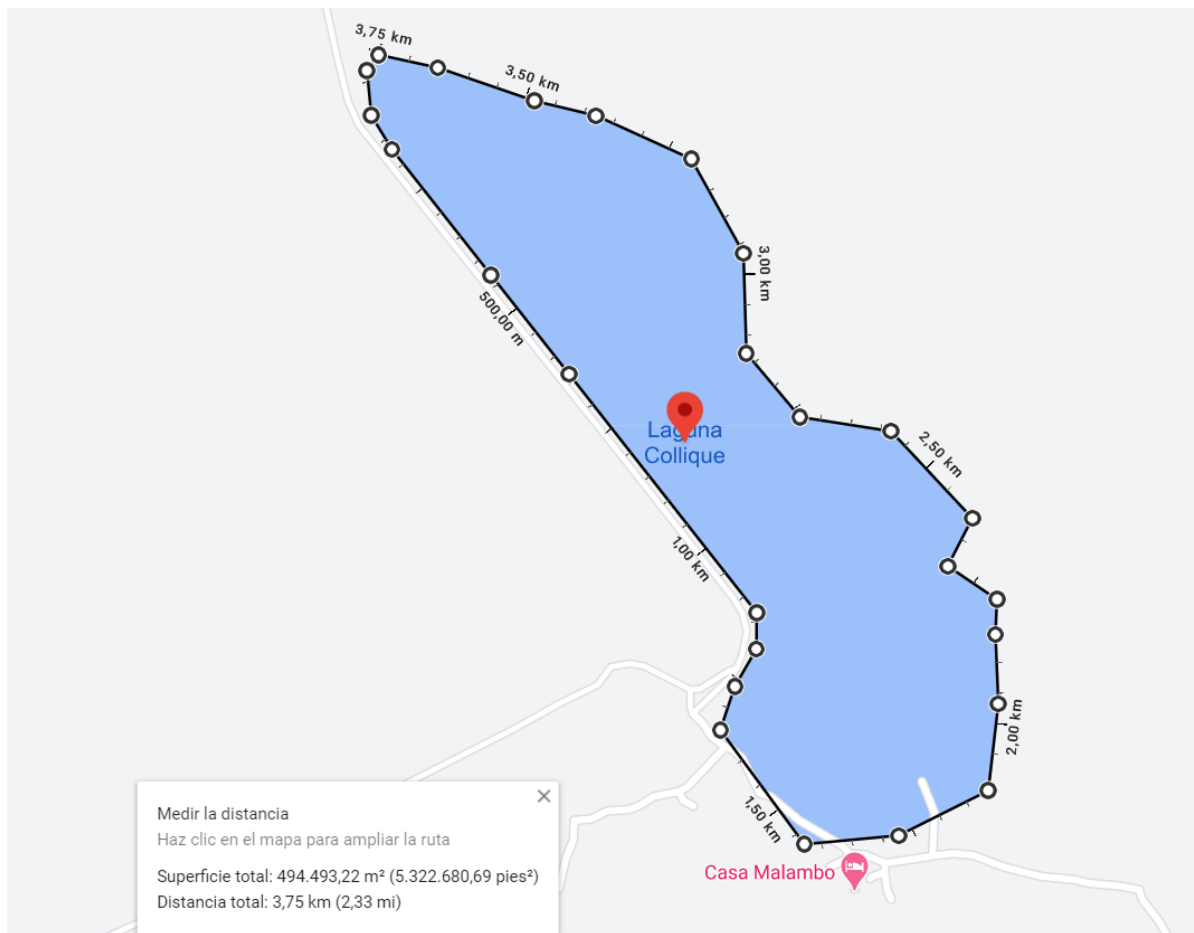
Se identificaron diversos cuerpos de agua lenticos que forman parte del sistema de abastecimiento y distribución hidráulica en Lambayeque. Entre ellos se encontraron reservorios, lagunas artificiales y cámaras de plantas de tratamiento administradas por EPSEL. La caracterización permitió reconocer dimensiones, usos y condiciones físicas relevantes para la instalación de sistemas fotovoltaicos flotantes, priorizando estabilidad, profundidad y accesibilidad para anclaje. Los resultados confirmaron que estos cuerpos de agua se encuentran vinculados a procesos de distribución utilizados directa o indirectamente en el riego agrícola, aunque en este estudio no se realizó evaluación del rendimiento agrícola.

4.1.2.1 Laguna Collique

Es una laguna ubicada en la región Lambayeque, en el distrito de Zaña con una altitud de 152 m.s.n.m.

Su posición UTM es PN54 con coordenadas $-6^{\circ}49'16''$ S y $-79^{\circ}33'41''$ W.

Figura 16
Laguna Collique



Fuente: Google Maps.

Al realizar la medición con la herramienta de Google Maps, obtenemos un área de 494,493.22 m^2 .

4.1.2.2 Reservorio Tinajones

Está ubicada en la región de Lambayeque, provincia de Chiclayo, deriva de las aguas de la Cuenca Chancay mediante un dique principal de 2 440 m y tres diques secundarios. Fue construido entre los años 1963 y 1968. Con un nivel de agua de 212.50 m.s.n.m.

Sus coordenadas son -6°38'8"S y -79°26'45"W.

Figura 17
Reservorio de Tinajones



Fuente: Google Maps

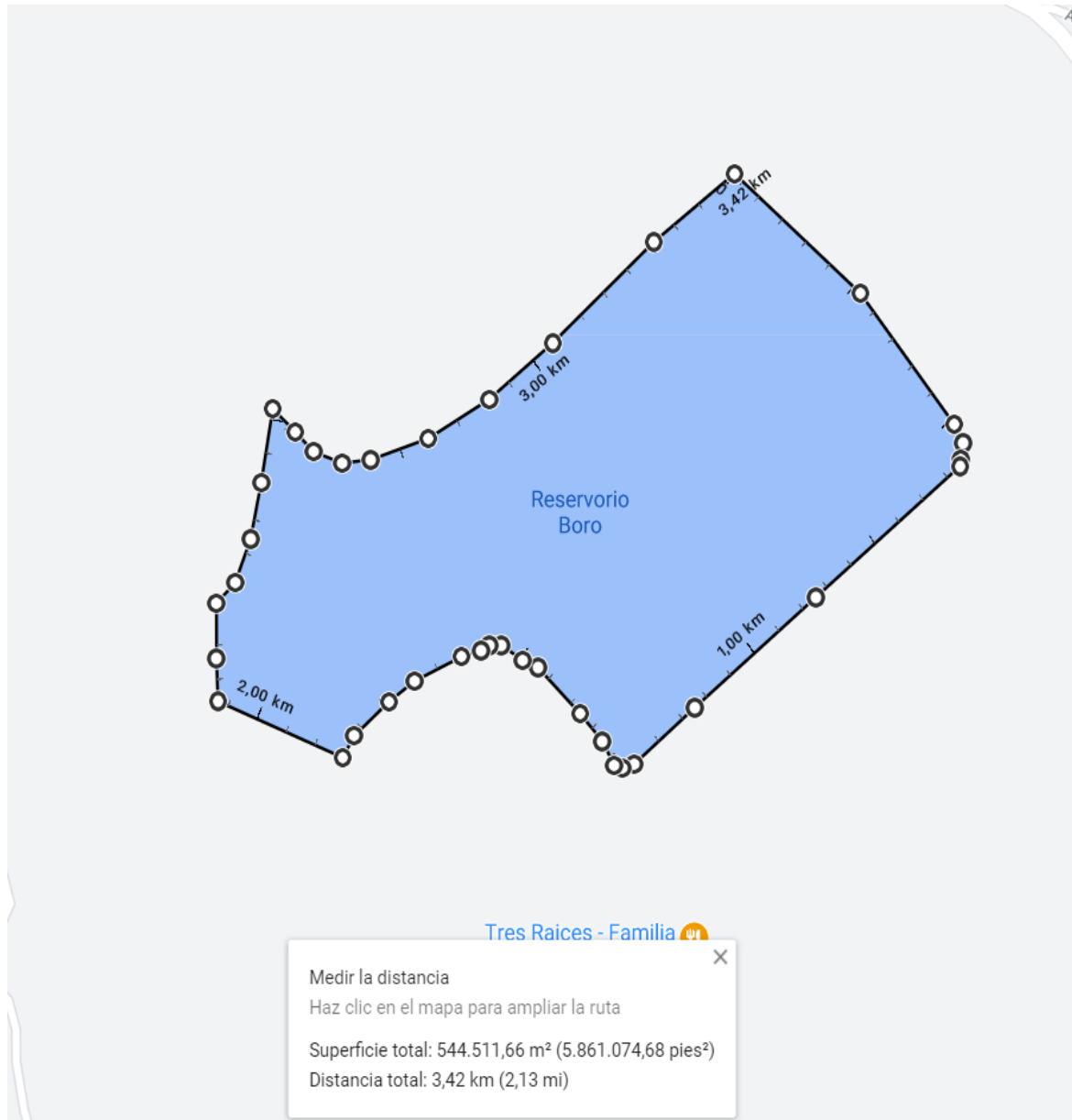
Utilizando la herramienta de medición de Google Maps, podemos establecer la superficie total disponible, siendo esta 16.08 km^2 .

4.1.2.3 Reservoir Boro

Es un embalse en la región de Lambayeque con una altitud de 48 m, sus coordenadas son:

-6.7869 S, -79 753 W.

Figura 18
Reservorio Boro



Fuente: Google Maps

Este reservorio cuenta con un área total de 544 511.66 m^2 .

4.1.2.4 Reservoir de Capote “Cartagena”

Ubicado en la región de Lambayeque, en el distrito de Picsi, cuenta con una profundidad de 12 m y con una extensión de 4 776 m.

Sus coordenadas son: -6.6906 S, -79.8416. W

Figura 19
Reservorio de Capote



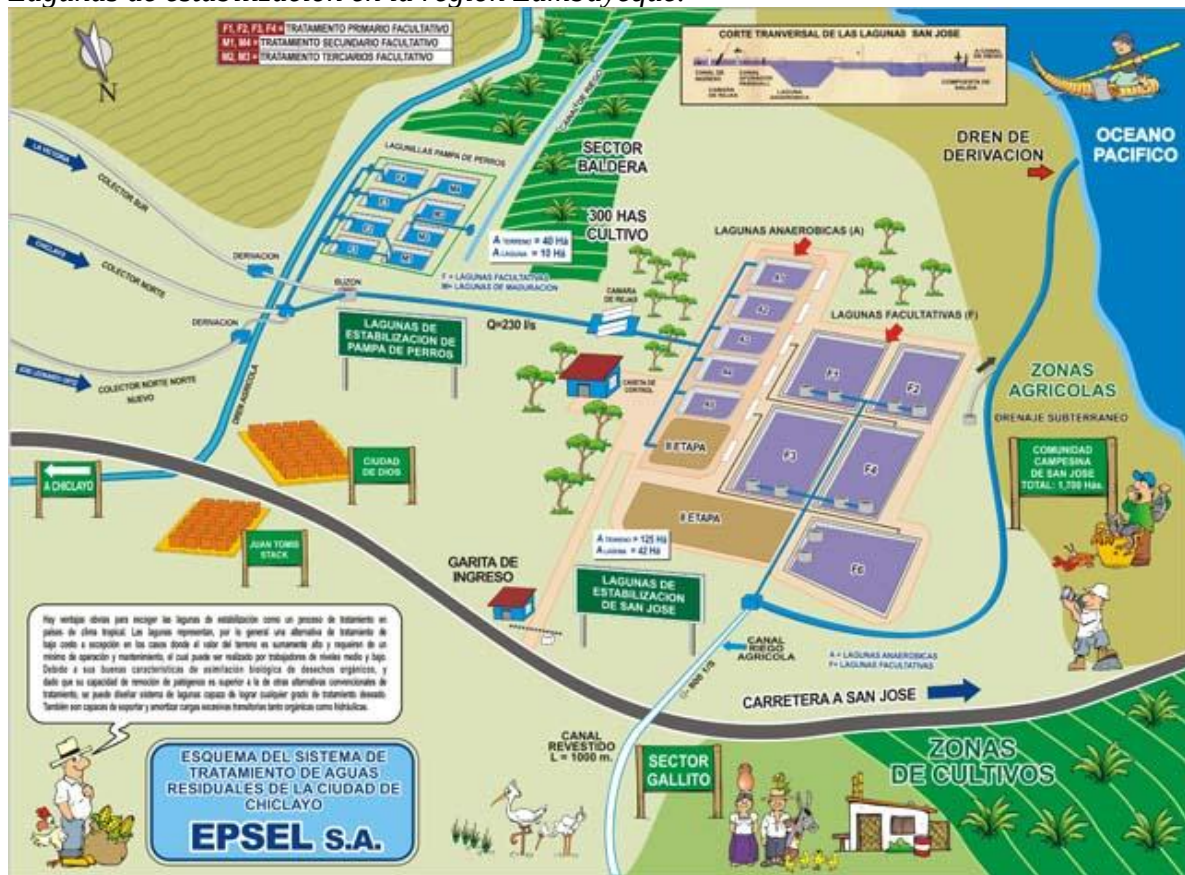
Fuente: Google Maps

Este reservorio cuenta con un área total de 292 446. 95 m².

4.1.2.5 Lagunas de estabilización de San José

Están ubicados en el distrito de San José, son lagunas artificiales y constituyen el sistema de tratamiento de aguas residuales.

Figura 20
Lagunas de estabilización en la región Lambayeque.

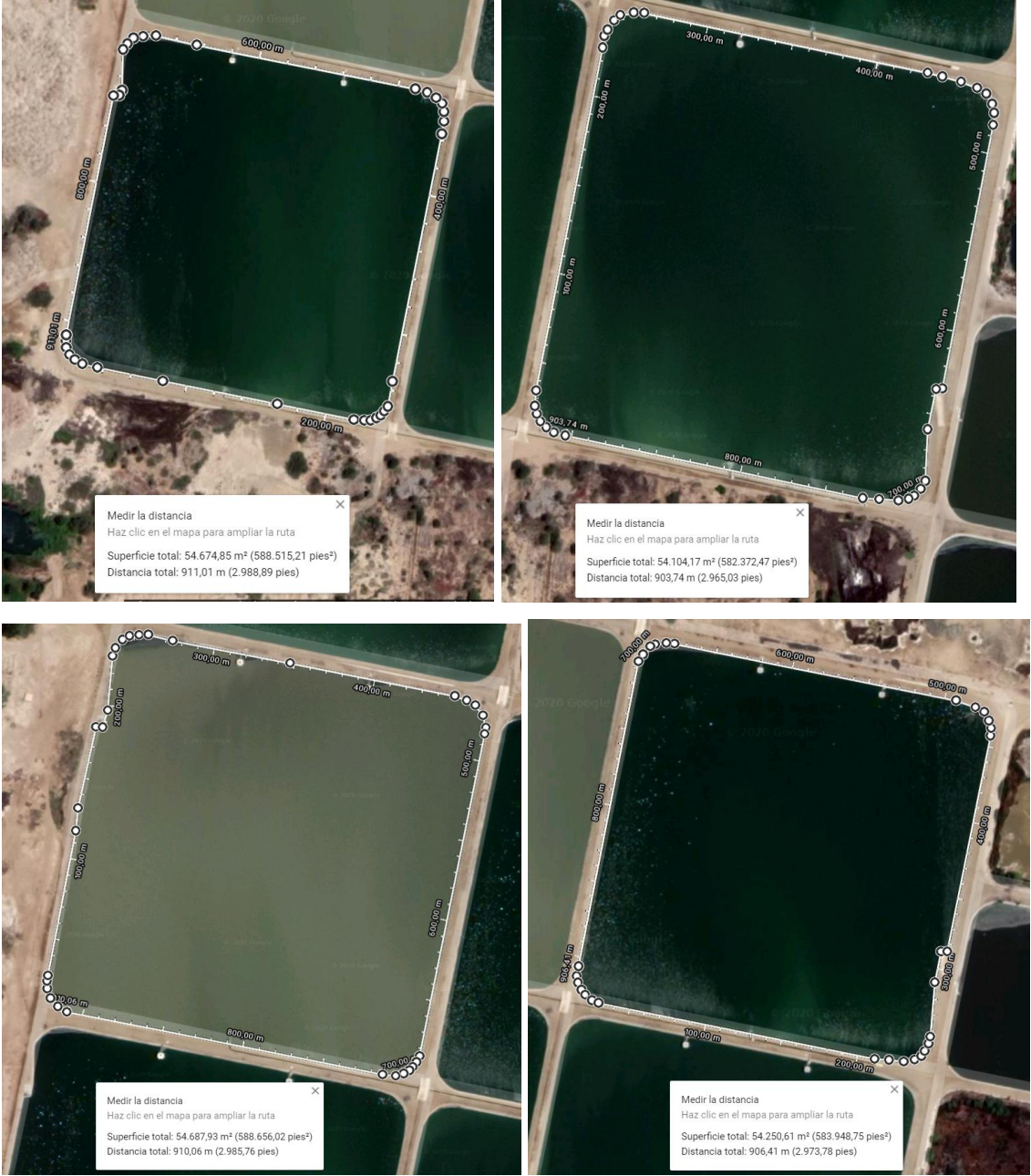


Fuente: EPSEL (2020)

Las lagunas de San José están ubicadas en el km. 6 de la carretera de Chiclayo-San José, a 500 metros de Ciudad de Dios. Presenta una capacidad de 76 850 metros y su unidad es para el tratamiento de aguas residuales drenadas por los colectores Norte y Sur Norte de la ciudad de Chiclayo.

Sus coordenadas son: 6°46'35.8"S 79°56'10.5"W.

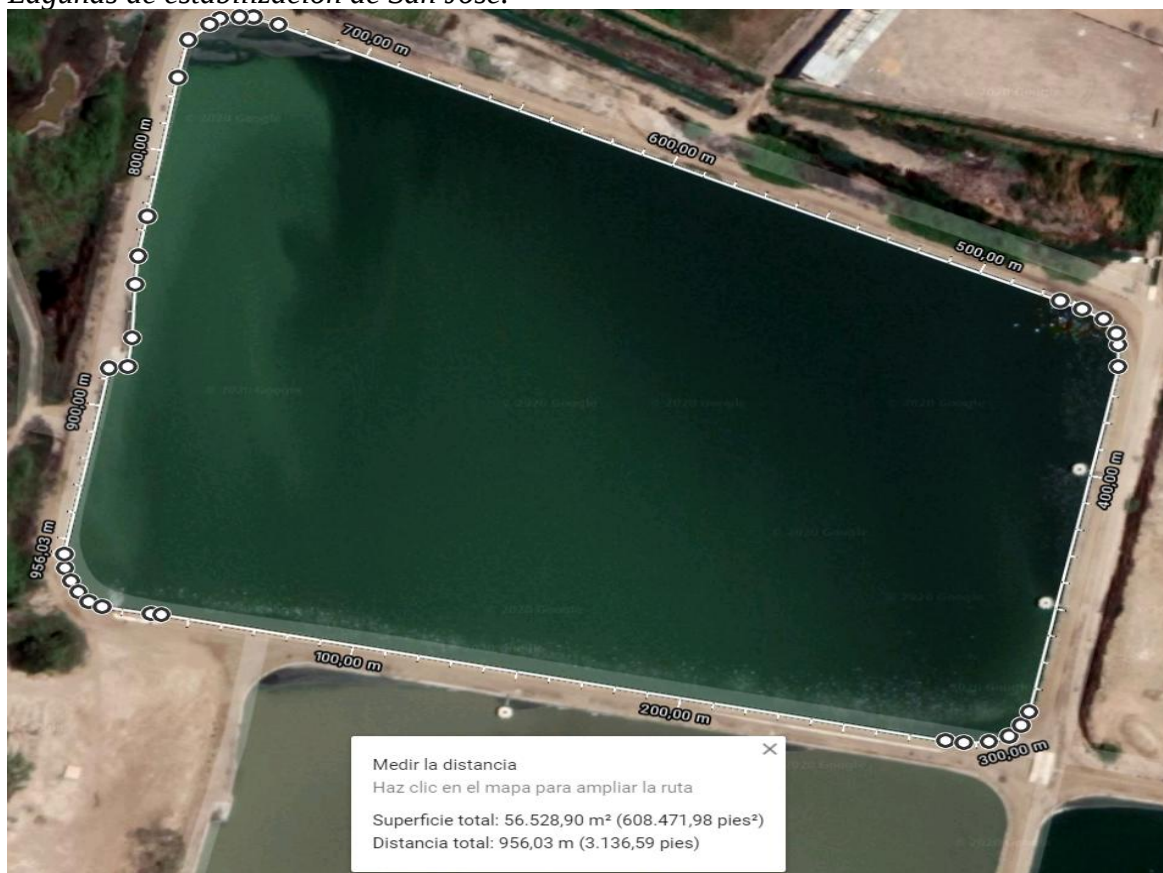
Figura 21
Lagunas de estabilización de San José.



Fuente: Google Maps.

Figura 22

Lagunas de estabilización de San José.



Fuente: Google Maps.

La superficie total disponible de las lagunas de estabilización de San José es de 274 246.46 m^2 .

4.1.2.6 Laguna de estabilización Pampa de Perros

Ubicada en la región Lambayeque, al igual que la laguna anterior se ubica al kilómetro 5 de la carretera Chiclayo – San José, y esta se encarga de tratar los desagües que son drenados por el emisor Norte de la Ciudad de Chiclayo. Son un conjunto de 8 lagunas de estabilización con una capacidad de 17 000 metros cúbicos por día.

Sus coordenadas son: 6°46'59.4"S 79°55'30.5"W.

Figura 23

Laguna de estabilización Pampa de Perros.



Fuente: Google Maps.

Cada laguna tiene un área de alrededor de 30 409.82 m^2 , con un área total entre las 8 lagunas de 243 278.56 m^2 .

4.1.2.7 Planta de tratamiento de agua potable I de Lambayeque

A diferencia de las demás, esta se encuentra por medio de la Google Earth, con coordenadas de $-6^{\circ}49'36''$ S y $-79^{\circ}55'16''$ W , con un perímetro total de 2 502,29 metros y una superficie total de 168 417,01 m².

Figura 24

Planta de Tratamiento de Agua Potable del Departamento de Lambayeque.



Fuente: Google Earth.

Aquí se muestran una de las dos plantas de tratamiento de agua, esta cuenta con ocho cámaras de filtración decentes, instaladas cerca al fundo San Isidro. El proceso consta de coagulación, floculación, decantación, filtración y desinfección.

4.1.3 Radiación solar en la región Lambayeque

El potencial solar incidente en esta región es muy alto y conlleva a un alto nivel de irradiación anual (Gastelo Roque, 2017). Según el clima y las variaciones del año, la radiación solar en la región Lambayeque fluctúa entre 5 a 6.5 Kw h/m², siendo los meses de octubre y noviembre los de mayor irradiación (ver Anexo 2).

Los valores de radiación solar obtenidos permiten validar técnicamente la factibilidad de instalación de sistemas fotovoltaicos flotantes en la región. La radiación anual estimada cumple con los requerimientos para producir energía de forma continua, haciendo posible el dimensionamiento de un sistema que pueda alimentar cargas eléctricas asociadas a equipos hidráulicos. Los datos se integraron en el programa SAM y en Helioscope, proporcionando valores precisos del desempeño energético del arreglo.

4.1.4 Parámetros de los cuerpos de agua (IH y Tm)

Se procede a mostrar dos de los parámetros más importante para el diseño de sistemas fotovoltaicos, los cuales son la irradiación y la temperatura. Estos, fueron obtenidos de la base de datos de la NASA, como promedio de los años de la cual el sistema tiene registro. Dichos valores permiten estimar estabilidad del módulo flotante, condiciones de enfriamiento natural y comportamiento térmico de los paneles. El análisis ratifica que la temperatura del agua contribuye a mejorar el desempeño energético del sistema flotante respecto a una instalación terrestre, debido al efecto de enfriamiento natural sobre la temperatura de operación de los módulos.

Primero se establecen los parámetros, donde:

IH: Irradiación en plano horizontal (Kwh/m²/dia)

Tm: Temperatura media (°C)

4.1.4.1 Parámetros de la Laguna Collique

Tabla 1

Irradiación y temperatura en laguna Collique.

2019	IH	Tm
ENE	5.7	23.73
FEB	5.55	24.72
MAR	5.84	23.93
ABR	5.38	23.02
MAY	4.89	22.29
JUN	4.47	21.48

JUL	4.48	20.5
AGO	4.91	20.21
SET	5.59	20.15
OCT	5.95	19.94
NOV	5.98	20.82
DIC	5.86	22.18

Fuente: NASA

4.1.4.2 Parámetros del Reservorio Tinajones

Tabla 2

Irradiación y temperatura en reservorio Tinajones.

2019	HSP	Tm
ENE	5.7	21.16
FEB	5.55	21.51
MAR	5.84	21.31
ABR	5.38	20.99
MAY	4.89	20.72
JUN	4.47	20.5
JUL	4.48	20.22
AGO	4.91	20.58
SET	5.59	20.54
OCT	5.95	19.74
NOV	5.98	19.81
DIC	5.86	20.17

Fuente: NASA

4.1.4.3 Parámetros del Reservorio Boro

Tabla 3

Irradiación y temperatura en Reservorio Boro.

2019	IH	Tm
ENE	5.7	23.73
FEB	5.55	24.72
MAR	5.84	23.93
ABR	5.38	23.02
MAY	4.89	22.29
JUN	4.47	21.48
JUL	4.48	20.5
AGO	4.91	20.21
SET	5.59	20.15
OCT	5.95	19.94
NOV	5.98	20.82
DIC	5.86	22.18

Fuente: NASA

4.1.4.4 Parámetros del Reservorio de Capote

Tabla 4

Irradiación y temperatura en Reservorio de Capote.

2019	IH	Tm
ENE	5.7	23.73
FEB	5.55	24.72
MAR	5.84	23.93
ABR	5.38	23.02
MAY	4.89	22.29
JUN	4.47	21.48
JUL	4.48	20.5
AGO	4.91	20.21
SET	5.59	20.15
OCT	5.95	19.94
NOV	5.98	20.82
DIC	5.86	22.18

Fuente: NASA

4.1.4.5 Parámetros de la Laguna de estabilización de San José

Tabla 5

Irradiación y temperatura en Laguna de Estabilizacion de San José.

2019	IH	Tm
ENE	5.7	23.73
FEB	5.55	24.72
MAR	5.84	23.93
ABR	5.38	23.02
MAY	4.89	22.29
JUN	4.47	21.48
JUL	4.48	20.5
AGO	4.91	20.21
SET	5.59	20.15
OCT	5.95	19.94
NOV	5.98	20.82
DIC	5.86	22.18

Fuente: NASA

4.1.4.6 Parámetros de la Laguna de estabilización Pampa de Perros

Tabla 6

Irradiación y temperatura de laguna de Estabilización Pampa De Perro

2019	IH	Tm
ENE	5.7	23.73
FEB	5.55	24.72
MAR	5.84	23.93
ABR	5.38	23.02
MAY	4.89	22.29
JUN	4.47	21.48
JUL	4.48	20.5
AGO	4.91	20.21

SET	5.59	20.15
OCT	5.95	19.94
NOV	5.98	20.82
DIC	5.86	22.18

Fuente: NASA

4.1.4.7 Parámetros de la Planta de Tratamiento de Agua Potable I

Tabla 7

Irradiación y temperatura de la PTAP.

2019	IH	Tm
ENE	5.7	23.73
FEB	5.55	24.72
MAR	5.84	23.93
ABR	5.38	23.02
MAY	4.89	22.29
JUN	4.47	21.48
JUL	4.48	20.5
AGO	4.91	20.21
SET	5.59	20.15
OCT	5.95	19.94
NOV	5.98	20.82
DIC	5.86	22.18

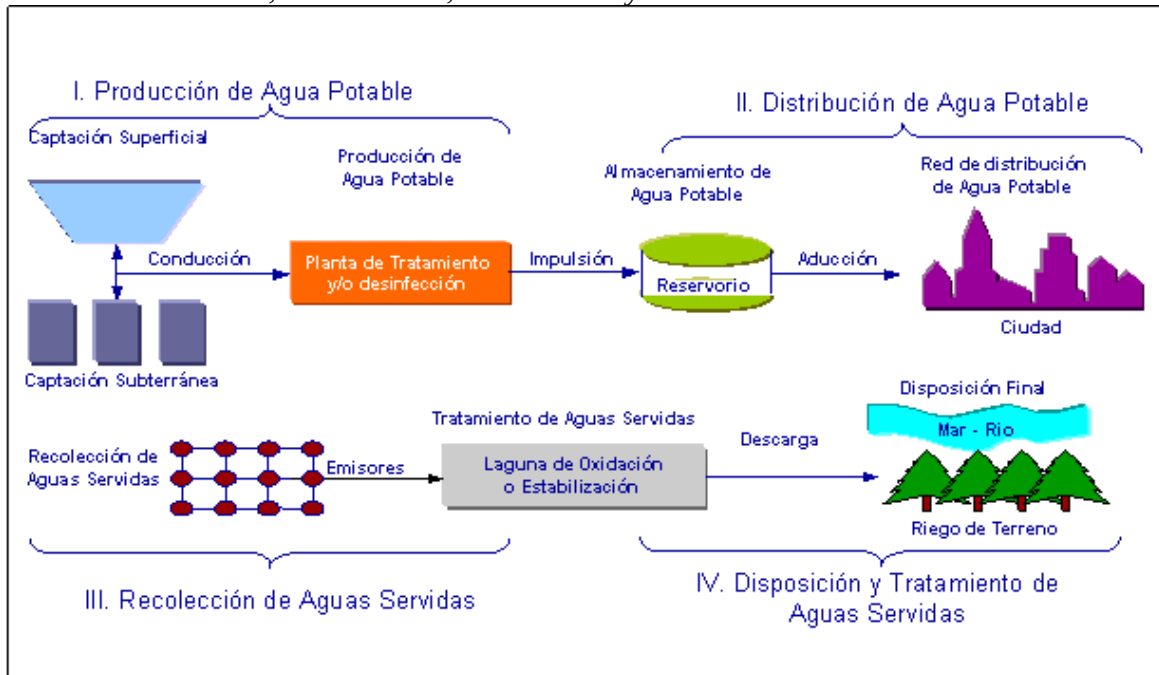
Fuente: NASA

4.1.5 Selección del lugar típico para el diseño

Después de comparar diferentes alternativas, la Planta de Tratamiento de Agua Potable I fue seleccionada como caso típico por su estabilidad hidráulica, facilidad de monitoreo y disponibilidad de información operacional. La PTAP forma parte del sistema de distribución que emplea estaciones de bombeo y suministro hidráulico, el cual se utiliza para abastecer zonas urbanas y áreas con fines agrícolas. Por lo tanto, el sistema diseñado tiene aplicación energética para cargas de bombeo asociadas al ciclo de suministro hidráulico sin que el presente estudio mida variables agronómicas.

Figura 25

Ciclo de Producción, Distribución, Recolección y Tratamiento.



Fuente: EPSEL (2020)

Como se observa en la figura anterior, el proceso inicia en la producción de agua potable, la cual es tratada en una planta de tratamiento o desinfección y almacenada en un reservorio hasta llegar a la red de distribución. Por último, se recolecta el agua servida en emisores que son tratados en lagunas de estabilización para ser descargadas en el mar o en zonas de riego.

Entonces, según el ciclo tenemos tres grupos de agua, las captaciones (superficiales o subterráneas), los reservorios y las lagunas de oxidación o estabilización. Tenemos que analizar la viabilidad de instalar un sistema fotovoltaico flotantes en cada uno de estos cuerpos de agua.

Figura 26

Sistema de Abastecimiento de Agua Potable para Chiclayo.

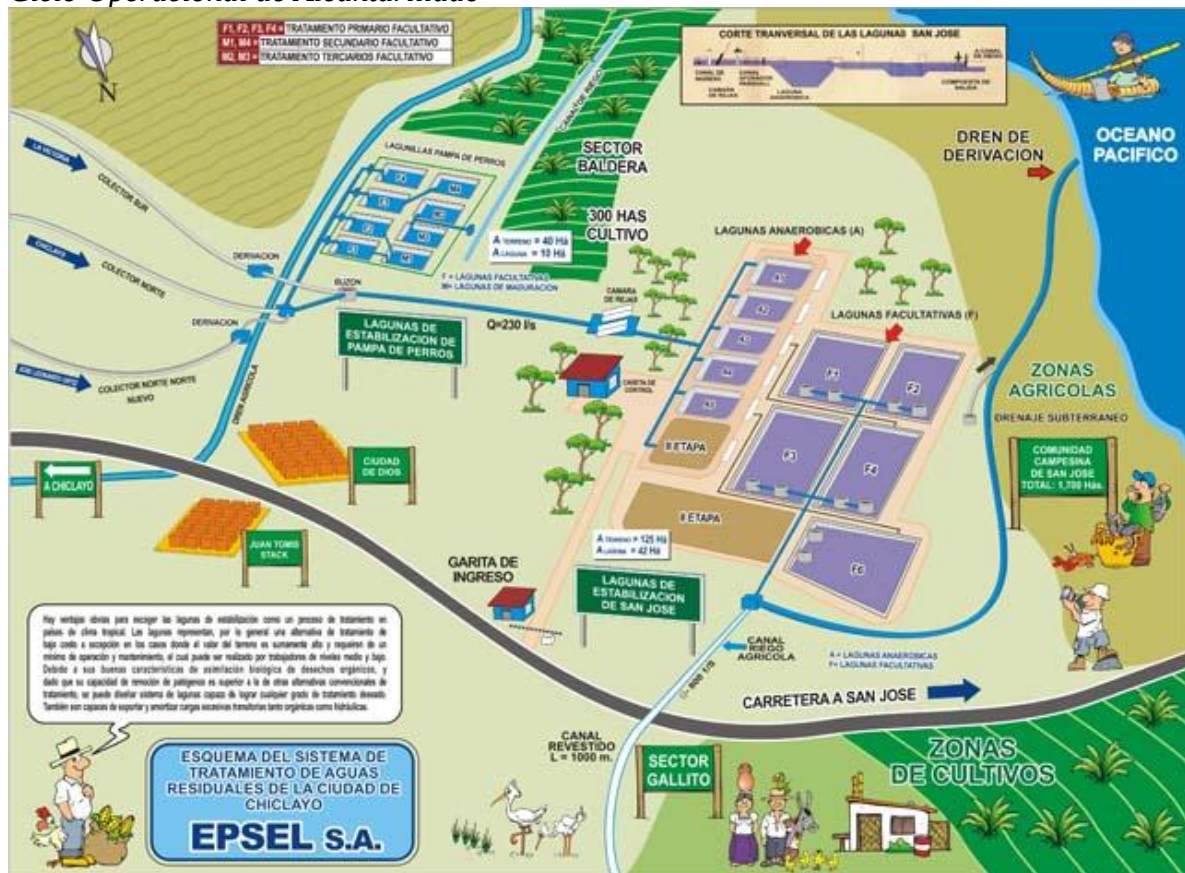


Fuente: EPSEL (2020)

Habiendo analizado el ciclo de agua potable, procedemos a analizar el proceso para el abastecimiento en la región Lambayeque, el cual se muestra en la figura anterior. Como se señala, la red comienza desde el reservorio tinajones, que por medio de canales distribuye el agua hasta llegar a las lagunas, siendo en este caso Boro I y Boro II. Después, las aguas recogidas del reservorio son desinfectadas en las plantas de tratamiento de agua para ser distribuidas hacia la población.

En el tramo hacia el reservorio Boro, se cuenta con dos plantas de tratamiento de agua cruda, siendo la primera de una capacidad de 700 l/s con tres electrobombas de 48 HP, cada una con un flujo de 250 l/s instaladas en la estación de rebombeo, además cuenta con una estación de bombeo de 200 HP por electrobomba en la etapa de desinfección, la cual permite la distribución de agua potable hacia el consumidor. Por otro lado, la segunda planta de tratamiento con una estación de bombeo de 400 kW que consta de tres electrobombas, no tiene estación de rebombeo dado que el agua llega por medio de la gravedad.

Figura 27
Ciclo Operacional de Alcantarillado



Fuente: EPSEL (2021)

En este caso, podemos notar el sistema de alcantarillado de la zona de Lambayeque, que consta de las lagunas de estabilización de Lambayeque, que consta de dos, de la laguna Pampa de Perros y la Laguna de San José.

El problema de estas lagunas facultativas, aeróbicas o anaeróbicas, es la emisión de metano. Por ese motivo, es peligroso instalar un sistema fotovoltaico flotante en estas lagunas, dado el peligro que representa el metano y los demás gases combustibles emitidos por la laguna. Así como menciona Medina y Barboza (2018) en su trabajo de investigación, las lagunas de estabilización de la región Lambayeque, no es tan optimizadas y contiene una serie de problemas que provocan una gran emisión de metano, lo que deteriora el ambiente a su alrededor y causa problemas a sus trabajadores. Esto también se revisa en la tesis de Chávez (2008), la cual evaluó las lagunas de San José para la instalación de una planta de energía de tecnología biomasa, aprovechando el metano.

El sistema de riego en el departamento consiste en canales que aprovechan la gravedad para poder llevar el agua hacia las zonas de cultivo, en uso de balsas de riego no es muy

empleado por los agricultores en esta parte del Perú, por eso es que se diseñará el sistema fotovoltaico con el fin de abastecer a las plantas que bombean agua potable hacia los agricultores y las ciudades.

Entonces, en base a lo estudiado en el sistema de agua potable de Lambayeque, se seleccionarán las plantas de tratamiento de agua potable de Lambayeque, ubicados en la ciudad de Lambayeque.

Aunque las cámaras de filtración de la PTAP no constituyen balsas de regadío en el sentido estricto, se han considerado en este estudio como un cuerpo de agua artificial disponible para el diseño del sistema fotovoltaico flotante, debido a su proximidad con la infraestructura de bombeo agrícola de la región y su conexión con los sistemas de distribución de agua para riego.

Dado que la planta cuenta con ocho cámaras, se seleccionará aquella que está más cerca de las instalaciones y facilite la conexión de los equipos eléctricos.

Figura 28

Cuerpo de Agua Artificial de la Cámara de filtración seleccionada para el sistema fotovoltaico.



Fuente: Google Earth

4.1.6 Diseño del Sistema Fotovoltaico Flotante

Se dimensionó un arreglo flotante con módulos fotovoltaicos, sistema de flotación Hydrelío y estructura de anclaje, seleccionando configuración, espaciamiento y orientación que maximicen la captación solar. El diseño consideró los requerimientos eléctricos del inversor, el cableado, el sistema de protección, y la integración con la red eléctrica utilizada para el accionamiento de estaciones de bombeo. La parte flotante garantiza estabilidad mecánica, seguridad y eficiencia térmica.

Primero, la zona de instalación es la PTAP de la corporación EPSEL, al igual que las lagunas de estabilización, estas cuentan con una profundidad máxima de 2.5 metros, lo cual es factible para la instalación de estos sistemas. Está conformada por un total de 8 cámaras y una potencia establecida por las estaciones de bombeo y rebombeo, la primera consta de cuatro electrobombas de una capacidad de 200 HP cada una, y la unidad de rebombeo se conforma por una batería de tres electrobombas de 48 HP cada una. En total, la planta tiene una potencia de 944 HP solo para el sistema de electrobombas. (EPSEL, 2020)

La capacidad de las electrobombas es de 703.94 kW, por lo que se tomará este dato para el diseño del sistema fotovoltaico.

4.1.6.1 Selección del módulo flotante

Para el dimensionamiento, primero se tiene que seleccionar el módulo flotante y el módulo fotovoltaico a emplear. En este caso, dado que el diseño se asemeja al realizado por Menéndez (2018), se tomará en consideración los modelos empleados en su diseño. Los criterios fueron: material de fabricación, resistencia mecánica y el tamaño de los módulos fotovoltaicos. Los fabricantes que lideran el mercado en estos productos son: NGR Island, Esfera Solar, Isigenere Renovables y Ciel & Terrel.

De las marcas mencionadas, la última lleva la vanguardia y la ventaja en instalaciones flotantes, con mucha demanda en el mercado y habiendo instalado seis mega proyectos fotovoltaicos flotantes alrededor del mundo.

El módulo empleado se llamada Hydrelío, el cual cuenta con soportes de aluminio y una estructura a base de HDPE (polímero), las uniones entre módulos son de fibra de vidrio reforzada y es compatible para módulos de 60 a 72 celdas fotovoltaicas. Además de las características, cuenta con una vida útil superior a los 20 años y un precio asequible.

Las características técnicas del módulo flotante se encontrarán en el Anexo 3.

Figura 29

Vista de la instalación fotovoltaica flotante con sistema Hydrelío.



Fuente: Menéndez (2018)

A diferencia de las balsas de regadío convencionales, las cámaras son rectangulares con un fondo diseñado para la extracción de material obtenido del proceso de filtración, a través de la galería de válvulas. Esto es importante para seleccionar el sistema de amarre, que son de tres tipos: anclaje al fondo de la masa de agua, amarre a los bancos de la masa de agua y sistema mixto.

El más empleado es el sistema mixto, dado que brinda mayor estabilidad al sistema fotovoltaico, pero como la instalación se dará en una cámara de filtración con un sistema de válvulas instalados en el fondo de la cámara, es necesario elegir el sistema amarre a los bancos, es decir, a las paredes externas de la cámara.

La instalación es relativamente rápida, con un ritmo de 1 kWp/hora/operario, esto asegurado por la empresa Ciel & Terre. Un ejemplo del amarre por bancos se presenta en la figura siguiente:

Figura 30

Proceso de fijación de un operario para el sistema de amarre del módulo flotante.



Fuente: Menéndez (2018)

El área de instalación de los módulos flotantes en la cámara es importante para calcular la cantidad de módulos fotovoltaicos que pueden entrar en la superficie del cuerpo de agua.

4.1.6.2 Sistema fotovoltaico

4.1.6.2.1 Módulo Fotovoltaico

Se procede a seleccionar un módulo fotovoltaico, para esto se tiene en cuenta la lista TIER 1, la cual recopila aquellas empresas que han instalados sistemas fotovoltaicos de gran potencia y las clasifica de acuerdo a su producción. Una de las empresas que se ha mantenido en la lista en los últimos años es Jinko Solar, por lo que, se decidió escoger un módulo de esa marca, específicamente un EAGLE PERC-JKM380M-72-V-A1-EN de 72 celdas fotovoltaicas. Aunque no es el módulo con mayor potencia de la marca, es el que cumple con las características establecidas por flotador.

Figura 31

Características Eléctricas del módulo fotovoltaico.

SPECIFICATIONS

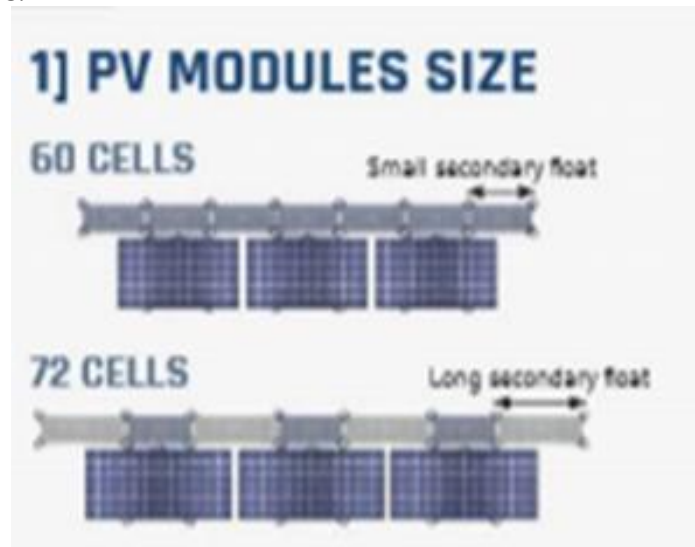
Module Type	JKM360M-72-V		JKM365M-72-V		JKM370M-72-V		JKM375M-72-V		JKM380M-72-V	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax)	360Wp	270Wp	365Wp	274Wp	370Wp	278Wp	375Wp	282Wp	380Wp	286Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	39.5V	37.7V	39.7V	37.9V	39.9V	38.1V	40.2V	38.3V	40.5V	38.6V
Maximum Power Current (Imp)	9.12A	7.17A	9.20A	7.24A	9.28A	7.30A	9.33A	7.36A	9.39A	7.42A
Open-circuit Voltage (Voc)	48.0V	46.5V	48.2V	46.8V	48.5V	47.0V	48.7V	47.2V	48.9V	47.5V
Short-circuit Current (Isc)	10.02A	7.61A	10.09A	7.68A	10.15A	7.75A	10.23A	7.82A	10.30A	7.88A
Module Efficiency STC (%)	18.55%		18.81%		19.07%		19.33%		19.58%	
Operating Temperature(°C)	-40°C~+85°C									
Maximum system voltage	1500VDC (IEC)									
Maximum series fuse rating	20A									
Power tolerance	0~+3%									
Temperature coefficients of Pmax	-0.37%/°C									
Temperature coefficients of Voc	-0.28%/°C									
Temperature coefficients of Isc	0.048%/°C									
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45±2°C									

Fuente: JINKO SOLAR (2020)

La cantidad de celdas de un módulo influye en el sistema flotante, ya que la instalación de los módulos secundarios depende del número de celdas, como se indica en la figura siguiente:

Figura 32

Configuraciones de los módulos fotovoltaicos en el sistema flotantes de acuerdo a su número de celdas.



Fuente: Menéndez (2018)

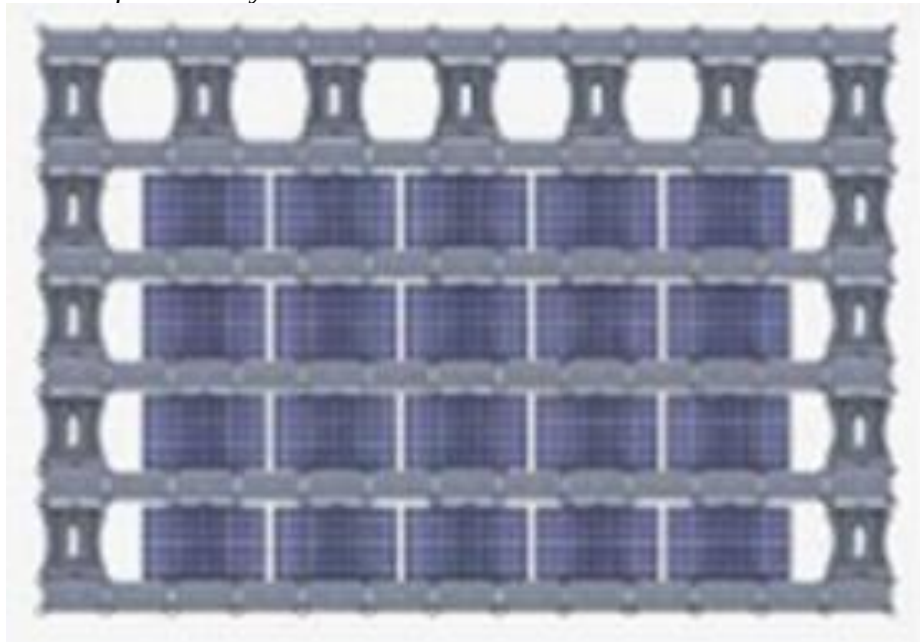
Se hará uso de flotador secundario o módulo flotante largo para la conexión entre módulos PV. Dado que no se tiene un registro del consumo eléctrico de la planta, se diseñará en base a la potencia de las electrobombas, que es un aproximado de 704 kW.

$$n_{\text{módulos}} = \frac{704 \text{ kW}}{380 \text{ W}} \cong 1854 \text{ módulos}$$

Cabe resaltar que, la planta cuenta con un sistema eléctrico conectado a red para abastecer de electricidad a las bombas, por lo que el diseño tiene como objetivo reducir al máximo el consumo de energía eléctrica. Así que, en base a las dimensiones de las cámaras y las dimensiones de los módulos tanto flotantes como fotovoltaicos, se distribuyen en la superficie del cuerpo de agua.

Figura 33

Configuración típica de Layout.



Fuente: (Menéndez, 2018)

Como se mencionó, es necesario conocer las dimensiones de cada componente, un ejemplo típico se encuentra la figura, pero a diferencia de este sistema, hay que considerar el ángulo de elevación y orientación óptima de los módulos.

El ángulo de elevación viene determinado por la latitud en la que se encuentra el sistema, dado que estamos en la región de Lambayeque y la planta se encuentra a $6^{\circ}43'$ de latitud sur, el ángulo óptimo de elevación es de 6.45° grados aproximadamente.

Con respecto a la orientación del módulo, este debe estar orientado hacia la línea ecuatorial, por lo que para la región Lambayeque, el sistema tiene una orientación óptima hacia el norte. Se desea abarcar la mayor cantidad de espacio de la cámara, por lo que el sistema se adecuará a las dimensiones del cuerpo de agua.

Las dimensiones del módulo fotovoltaico son de 1956 x 992 mm y el módulo flotante es de 1975 x 993 mm máx. de largo y ancho, respectivamente. Los flotares secundarios entre filas es de 85 centímetros. Sabiendo eso, se procede a hacer el diseño en AUTOCAD.

4.1.6.2.2 Inversor

Pero antes, tenemos que encontrar el número de filas y el número de columnas del diseño fotovoltaico, eso se realizará en base al inversor elegido, para este caso se necesita un inversor con una potencia menor al del sistema. La fórmula empleada para este caso depende del ratio DC/AC que se muestra a continuación:

$$P_{AC} = \frac{P_{DC}}{k}; k = 1.1 - 1.4$$

$$P_{AC} = \frac{704 \text{ kW}}{1.4} \text{ a } \frac{704 \text{ kW}}{1.1}$$

$$P_{AC} = 502.86 \text{ a } 640 \text{ kW}$$

Por esta razón, se eligió un inversor PVS800-57-0630kW-B con un rango de tensión de 525-825 V y una intensidad de corriente máxima de 1145 A en parámetros DC. Con los datos de voltaje se encuentra la cantidad de paneles en serie:

$$\frac{525}{40.5} \leq n_{serie} \leq \frac{825}{40.5}$$

$$12.9 \leq n_{serie} \leq 20.37$$

Entonces, buscando la mayor cantidad de módulos en serie se toma el valor para un string de 19, con respecto a la corriente, teniendo la entrada máxima que puede soportar el inversor, se tiene:

$$n_{paralelo \text{ máx.}} = \frac{1145}{10.3}$$

$$n_{paralelo \text{ máx.}} \cong 110$$

La división entre el valor de corriente máximo permitido y el valor de cada string de módulos fotovoltaicos, indica que se puede conectar un máximo de 110 strings en paralelo. Ahora, dado que la cantidad de paneles necesarios para alcanzar la potencia establecida es de 1854 módulos fotovoltaicos. Si dividimos el total de módulos entre el string de **20**, se obtiene una cantidad aproximada de 93 líneas, pero como el diseño está sujeto a agrupaciones en los combiner box que son de 20-24-28-32, se aproxima a **96** strings en paralelo, lo cual indica una cantidad total de **1920** módulos para el diseño final con una potencia DC de **729.6 kW**. Se verifica que el inversor siga dentro del ratio “k”,

obteniendo un ratio de 1.158 verificando el parámetro y el inversor escogido para el diseño.

Figura 34

Características técnicas del inversor.

Código de tipo	PV5800-57-0500kW-A	PV5800-57-0630kW-B	PV5800-57-0875kW-B	PV5800-57-1000kW-C
Entrada (CC)				
Rango de tensión CC, mpp (U_{CC})	450 a 825 V	525 a 825 V	525 a 825 V	600 a 850 V
Tensión CC máx. ($U_{CC, max}$)	1100 V	1100 V	1100 V	1100 V
Intensidad CC máx. ($I_{CC, max}$) ¹⁾	1145 A	1230 A	1710 A	1710 A
Número de entradas CC protegidas	4 a 15 (+/-)	4 a 15 (+/-)	8 a 20 (+/-)	8 a 20 (+/-)
Salida (CA)				
Potencia de salida CA nominal ($P_{CA, nom}$) ²⁾	500 kW	630 kW	875 kW	1000 kW
Potencia de salida máx. ³⁾	600 kW	700 kW	1050 kW	1200 kW
Potencia a cosφ = 0.95 ¹⁾	475 kW	600 kW	830 kW	950 kW
Intensidad nominal CA ($I_{CA, nom}$)	965 A	1040 A	1445 A	1445 A
Tensión nominal ($U_{CA, nom}$) ²⁾	300 V	350 V	350 V	400 V
Frecuencia de salida (f_{CA})	50/60 Hz	50/60 Hz	50/60 Hz	50/60 Hz
Distorsión armónica de la intensidad ⁴⁾	< 3%	< 3%	< 3%	< 3%
Estructura de la red ⁵⁾	TN e IT	TN e IT	TN e IT	TN e IT
Rendimiento				
Rendimiento máx. ⁶⁾	98.6%	98.6%	98.7%	98.8%
Euro-eta ⁶⁾	98.2%	98.4%	98.5%	98.6%
Consumo de energía				
Consumo propio en funcionamiento	490 W	490 W	650 W	650 W
Consumo en modo de espera	65 W	65 W	65 W	65 W
Tensión auxiliar externa ⁷⁾	230 V, 50 Hz	230 V, 50 Hz	230 V, 50 Hz	230 V, 50 Hz
Dimensiones y peso				
Anchura/Altura/Profundidad, mm	2630/2130/708	2630/2130/708	3630/2130/708	3630/2130/708
Peso aprox. ⁸⁾	1800 kg	1800 kg	2320 kg	2320 kg

Fuente: ABB

4.1.6.2.3 Combiner box

Como el sistema tiene mucha cantidad de módulos y el inversor solo cuenta con dos entradas, tenemos que combinar los string en mediante cajas de agrupación o combiner box. Como se mencionó, existen variedades de modelos que combinan varias entradas, en este caso vamos a emplear el **String Combiner de 1000V DC - 32 st. de la marca ABB**, como existen 96 strings se requiere de 3 de estos string combiner. Además, se requiere de otro combiner box que agrupe las 3 conexiones de esos string combiner.

Figura 35

Características técnicas de los string combiner type de la marca ABB.

String combiner type	1 st.	2 st.	3 st.	4 st.	6 st.	8 st.	10 st.	12 st.	14 st.	16 st.	18 st.	20 st.	24 st.	28 st.	32 st.	
General Data																
Maximum Voltage	1000V DC															
No of DC Input (+ & -, optional)	1	2	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	28	32	
SPD protection	Type 2 Pluggable															
String protection	No	Per each incoming string														
Monitoring	No	Optional														
Monitoring Parameters	No	Current, temperature and SPD signal as standard. Optional to include Voltage and Disconnecter signal														
Communication Protocol	No	Modbus RS485														
Enclosure Type																
Model	Europa					Gemini										
Material Type	Thermoplastic															
Door Type/ Opening	Transparent, Hinged Door					Opaque, Hinged Door openable 180 Deg										
Lock Type	Click on push to lock					Doors supplied with 2 standard double bit locks (3 for sizes 5 and 6)										
Number of incoming strings	From 1 to 4					From 6 to 32										
Rated Service Voltage	1000V DC															
Degree of resistance to impacts	IK 10															
Degree of protection	IP65					IP66										
Recyclable	100%															
Environmental data																
Operating Temperature °C	-20°C upto +50°C															
Storage temperature °C	-20°C upto +60°C															
Resistance to Abnormal heat and fire	upto 750°C															
Height above Sea level	Up to 2000m															
Humidity	up to 95%															
DC Input																
Input Cable entry	M16 Cable Gland, 2,5 - 16 mm²															
Input Connection	Terminals		Directly on the Fuse Holder													
Fuse Type	No fuse		Cylindrical 10x38 gPV													
Fuse Size			15A													
DC Output																
Output Cable gland +/-	M16	M16	M16	M16	M25	M25	M25	M32	M32	M32	M32	M40	M40	M40	M40	
Clamping cable diameter (mm²)	2,5-16				25-50				70-120				150-240			
Conductor material	Copper/Alluminium															
Terminal Type	Pipe terminal					Ring Terminal										
Voltage DC	1000V DC															
Maximun current output	10A	20A	30A	40A	60A	80A	100A	120A	140A	160A	180A	200A	240A	280A	320A	

Fuente: ABB (2021)

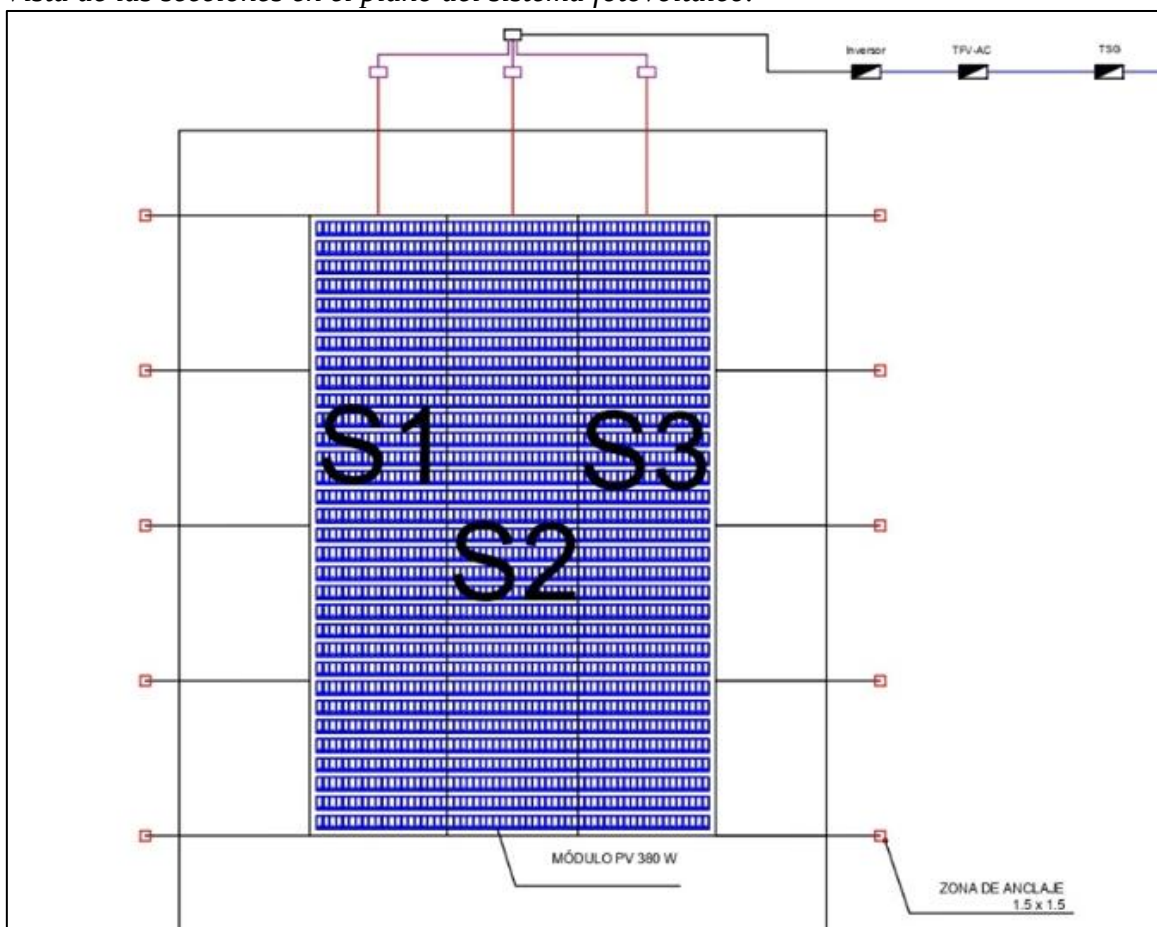
El diseño eléctrico de estos componentes se verá en la parte de diseño eléctrico y electrónica de potencia.

4.1.6.2.4 Secciones

Se denomina secciones a las regiones que tiene un combiner box, como estos poseen 32 entradas entonces una sección está conformada por 32 string en paralelo de un string de 20 módulos fotovoltaicos. Por lo tanto, se tienen tres secciones las cuales se representan en el plano del Anexo 4. Cada sección se conecta a un combiner box, para finalmente estos ser conectados al string combiners de tres entradas para así llevar solo dos líneas hacia el inversor.

Figura 36

Vista de las secciones en el plano del sistema fotovoltaico.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura se aprecia la dirección con respecto al norte, las tres secciones y las líneas rojas son los conductores que se conectan con los combiner box, con cada sección respectivamente. Además, se nota los anclajes posicionados en las partes laterales de la cámara de filtración, representados con un rectángulo de color rojo, en total son diez, cinco para cada lado. Una vista al sistema fotovoltaico encima de la cámara de filtro se muestra en la figura siguiente:

Figura 37

Vista de planta del sistema fotovoltaico flotante sobre el cuerpo de agua.



Fuente: HELIOSCOPE

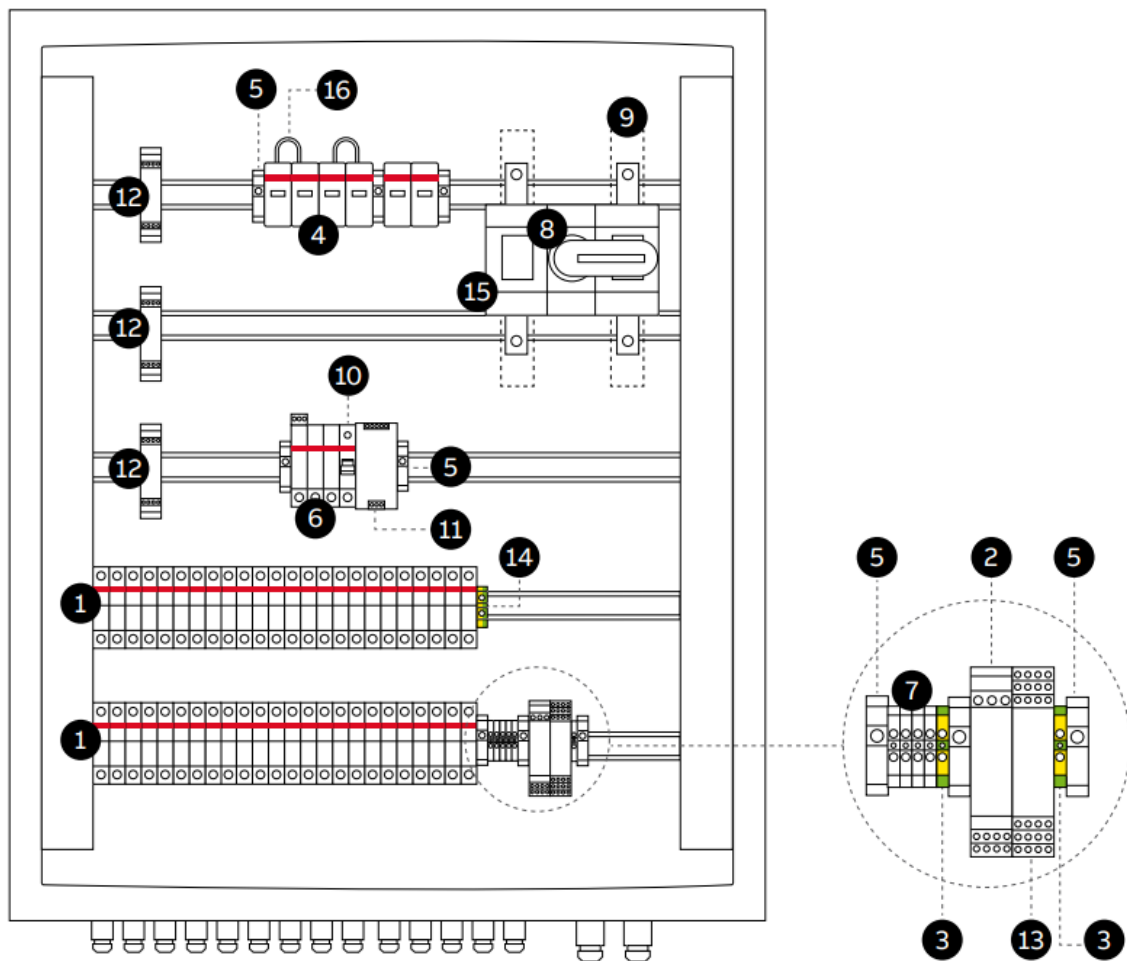
4.1.6.2.5 Protecciones

4.1.6.2.5.1 DC

En el caso de las protecciones DC, tenemos aquellas que se encuentran dentro del combiner box. En el catálogo del producto se tiene un ejemplo de conexión para una caja de 24 strings, lo tomaremos como base para explicar las protecciones y el número de accesorios que se requiere para que funcione adecuadamente el sistema.

Figura 38

Accesorios que componen al combiner box.



Fuente: ABB (2021)

Consta de 16 accesorios que son nombrados a continuación:

1. Fuse Holder
2. SCK-M-1500V (special accessory)
3. Terminal block M4 PE
4. Distribution block DBL160
5. Stop BAM3
6. Surge protection OVR TS
7. Terminal block M4 GREY
8. Switch disconnecter OTDC400EV11K
9. Shroud for OTDC
10. Switch E211
11. Power supplier CP-E 2,5 24V
12. SCK-M-I-8S-20A
13. SCK-C-MODBUS
14. Terminal block M35 PE
15. Aux contact OTDC (special accessory)
16. Erico 1ST622

El número 1 se trata del portafusibles, como se puede observar, depende de la cantidad de entradas, como en este caso es una caja de 24 string, se presentan 24 portafusible. Para nuestro sistema se requiere de 32 portafusibles capaces de accionar el sistema cuando se alcance corrientes cercanas a la de corto circuito, es necesario colocar un fusible cada tres circuitos conectados en paralelo. El módulo tiene una corriente nominal de 9.39 A y una corriente de corto circuito de 10.3 A.

La porta fusible seleccionado es de la familia ABB E90/32 PV para 1000 V, los datos técnicos del mismo se mencionan en la figura siguiente:

Figura

Datos técnicos del portafusibles del string combiner.

Type		E90/32 PV	E90/32 PV 1500
Reference standards	-	IEC 60947-3, UL 4248-1, UL 4248-18	IEC 60269-1,-2,-6 UL 4248-19
Rated current	[A]	30	32 (acc. IEC)/ 30 (acc. UL)
Rated operational voltage	[V]	1000 V DC	1500V DC
Fuse size	[mm]	10x30	10x85 and 10/14x85
Max power dissipation accepted	[W]	3	6
Tightening torque	[Nm]	PZ2 2-2.5 Nm (PZ2 18-22 lb-in)	PZ2 2-2.5 Nm (PZ2 18-22 lb-in)
Protection degree	-	IP20	IP20
Cross section rigid copper conductors (1 wire)	[mm ²]	1.5 - 25 (16-4 AWG)	
Cross section stranded copper conductors (1 wire)	[mm ²]	1.5 - 16 (16-5 AWG)	0.75 – 25 (18-4 AWG)
Cross section stranded copper conductors (2 wires of same sect.)	[mm ²]		0.75 – 10 (18-6 AWG)
Cable temperature	[°C]	CU 60, 75, 90	max 90 (acc. UL)
Operating temperature	[°C]	-0,125	> -5
Storage temperature	[°C]	-0,357142857	> -25
Temperature stability (main body)	[°C]		125
Approvals	-	UL, CCC, EAC	UL

Fuente: ABB (2021)

Los fusibles empleados son de tipos cilíndrico, y su rango va a de 1 a 30 amperios.

Figura 40

Datos técnicos del fusible para el string combiner.

Type		E9F PV	E9F PV 1500
Reference standards	-	IEC 60269-6; ROHS 2002/98/CE, UL	IEC 60269-6; ROHS 2002/98/CE, UL
Rated current	[A]	1..30	4...32
Rated operational voltage	[V]	1000 DC	1500 DC
Breaking capacity	[kA]	10	50
Overall dimensions	[mm]	10.3x38	10x85

Fuente: ABB (2021)

Para seleccionar el fusible, se hace referencia a la siguiente fórmula:

$$I_{fusible} = 1.25 * 1.25 * I_{sc}$$

$$I_{fusible} \cong 16 A$$

Por lo que, la capacidad del fusible es de 16 A.

Para el caso del interruptor DC, se tiene la siguiente fórmula:

$$I_{\text{termomagnético DC}} = n_p * 1.25 * 1.25 * I_{sc}$$

En el caso del string combiner de 32 entradas, tenemos:

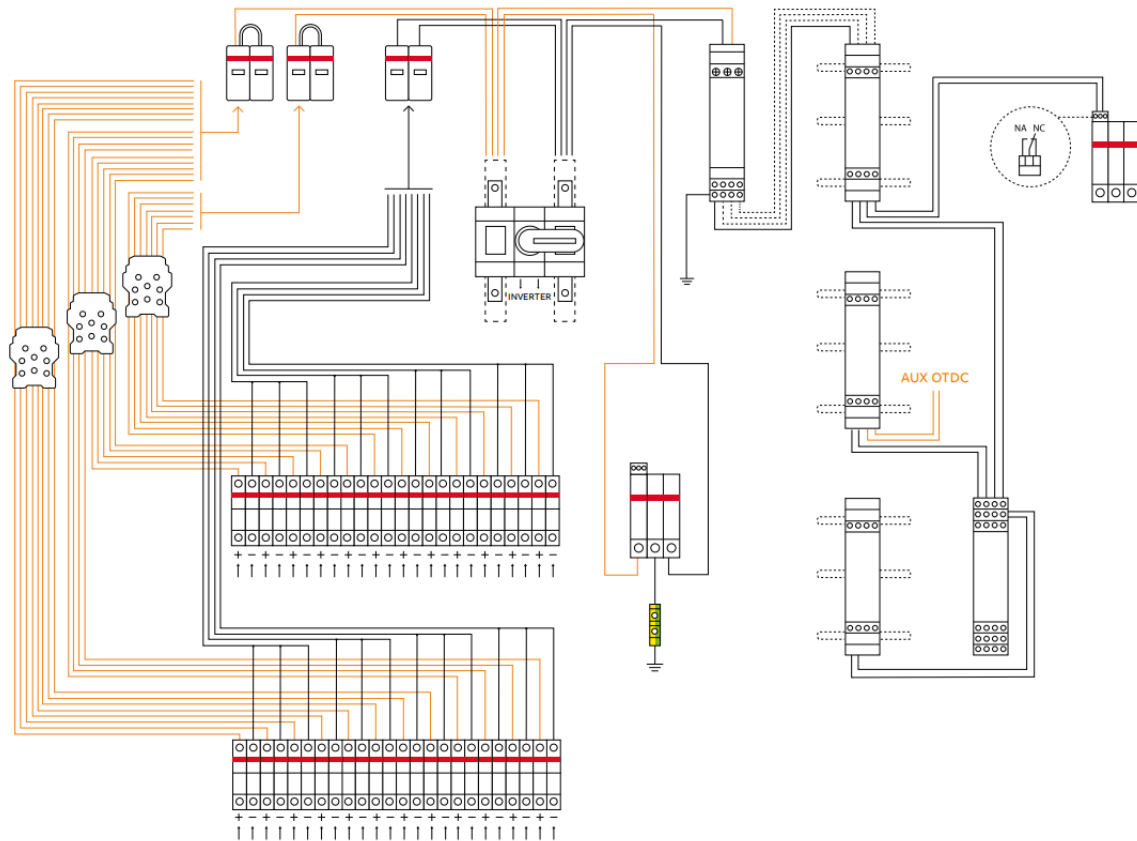
$$I_{\text{termomagnético DC}} = 32 * 1.25 * 1.25 * 10.3$$

$$I_{\text{termomagnético DC}} = 515 \text{ A}$$

Mientras que, para el string combiner final, donde se conectan tres strings, será el triple del valor que hemos calculado anteriormente, por lo que la capacidad debe de ser de 1545 A.

Figura 41

Conexión dentro del string combiner de la marca ABB.



Fuente: ABB (2021)

A parte de lo ya mencionado, con respecto al número de entradas del string combiner, tenemos que el inversor colocado en la figura se reemplaza por otro string combiner de tres entradas.

Otra protección importante son los busbars incorporados. Este modelo de equipo ABB cuenta con un busbar incorporado de la marcada E90 PV, con características que se muestran a continuación:

Figura 42

Características técnicas del Busbar E90 PV.

Main technical specifications		DC-Busbar 30mm ²	
Type	1 Phase	2 Phase	
Material	Copper	Copper	
Surface	Plain	Plain	
Insulation	ABS Grey RAL 7035		
End Cap	ABS Grey RAL 7035		
Technical data			
Heat deflection Temp. Long Term	90°C UL 94V0		
Heat deflection Temp. Short term	113°C UL94V0		
Comparative Tracking Index	600V		
Standards	EN60947-1:2007/IEC 60947-1:2007		
Insulation Coordination	Overvoltage Category III/ Degree of Pollution 2		
Electrical Data			
Max. electrical load	690V AC/1000V DC	690V AC/1000V DC	
Protection Class:	IP20		
Short Circuit Rating	IPK=25kA/0.1s (Surge Energy Capacity IPK) ICC 100kA-NH3 355A gC500V JM		
Impulse Voltage Strength	≥8.5KV		
Dielectric Strength	>32 kV/mm		
Capacity at 35°C ambient temperature depending on the feeding point			
Cross Section	30 mm ²		
Busbar Length	max. 1000mm	max. 300mm	
Feeding at beginning/ending			
Max Current Is/Phase	120A	200A	
Other Feeding Max current Is/Phase	160A	250A	

Fuente: ABB (2021)

4.1.6.2.5.2 AC

En el caso del interruptor AC, se calcula de manera similar, pero considerando que el sistema es trifásico, en Perú es de un voltaje de 380V.

$$I_{AC} = \frac{P_{AC}}{380}$$

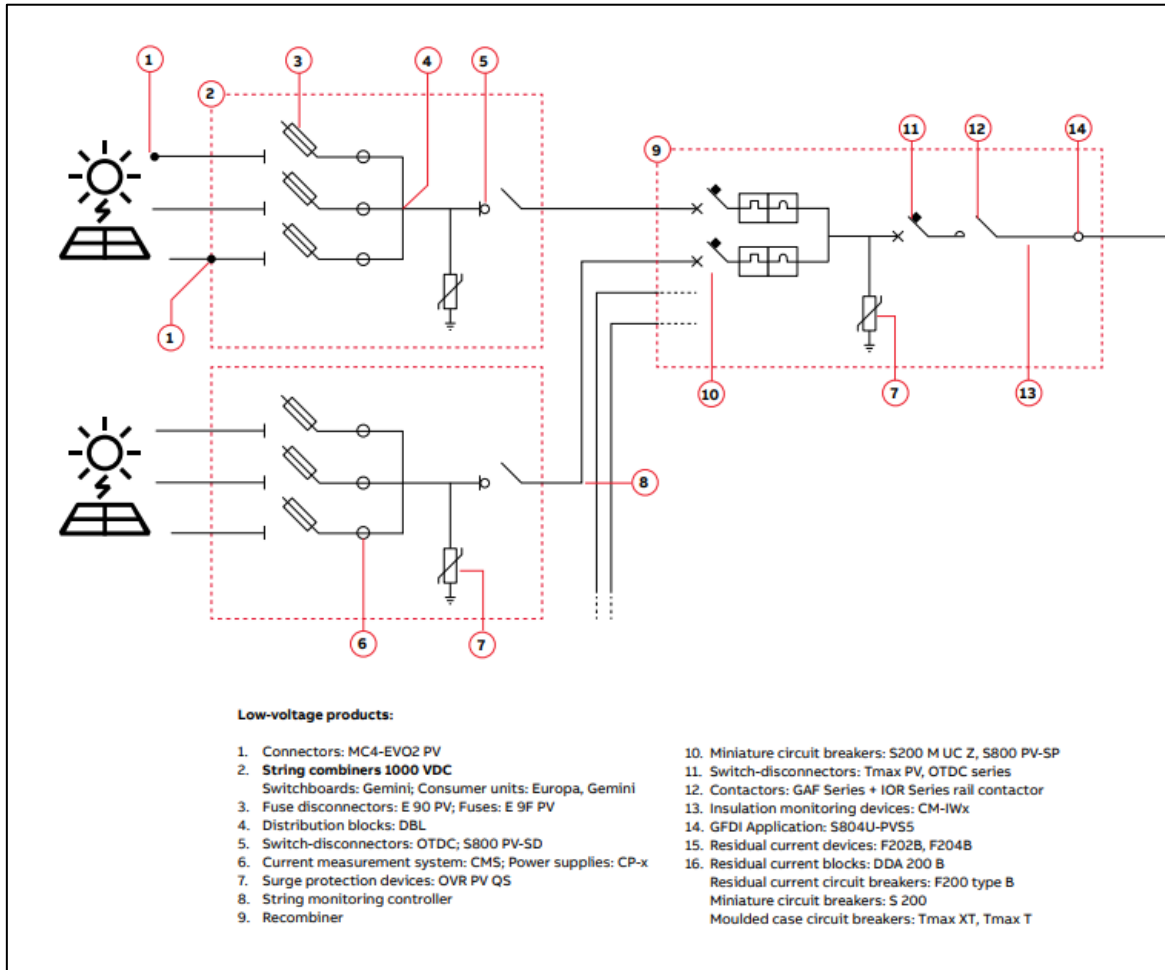
$$I_{AC} = \frac{729.6 \text{ kW}}{380}$$

$$I_{AC} = 1920$$

Se necesita una protección de 1920 A.

4.1.6.2.6 Conexión del Sistema

Se ha mencionado el sistema de conexión muchas veces cuando se mencionan los combiner box y los circuitos derivados del diseño del sistema. Para este caso, como el inversor está en el rango de 20-1000 kW, se tiene este tipo de configuración.



Fuente: ABB (2021)

En ese diagrama, el string combiner se encuentra en el punto 2 y a diferencia del ejemplo mostrado, para este trabajo se requiere de 32 conexiones en paralelo.

4.1.7 Electrónica de Potencia

La electrónica de potencia del sistema fue definida considerando el inversor más adecuado, la topología de conexión y los sistemas de protección. Esto permite evaluar el desempeño eléctrico bajo condiciones reales y asegurar la correcta operación del sistema cuando se integra al accionamiento de bombas hidráulicas. La selección se basó en catálogos técnicos y estándares internacionales aplicables a sistemas fotovoltaicos.

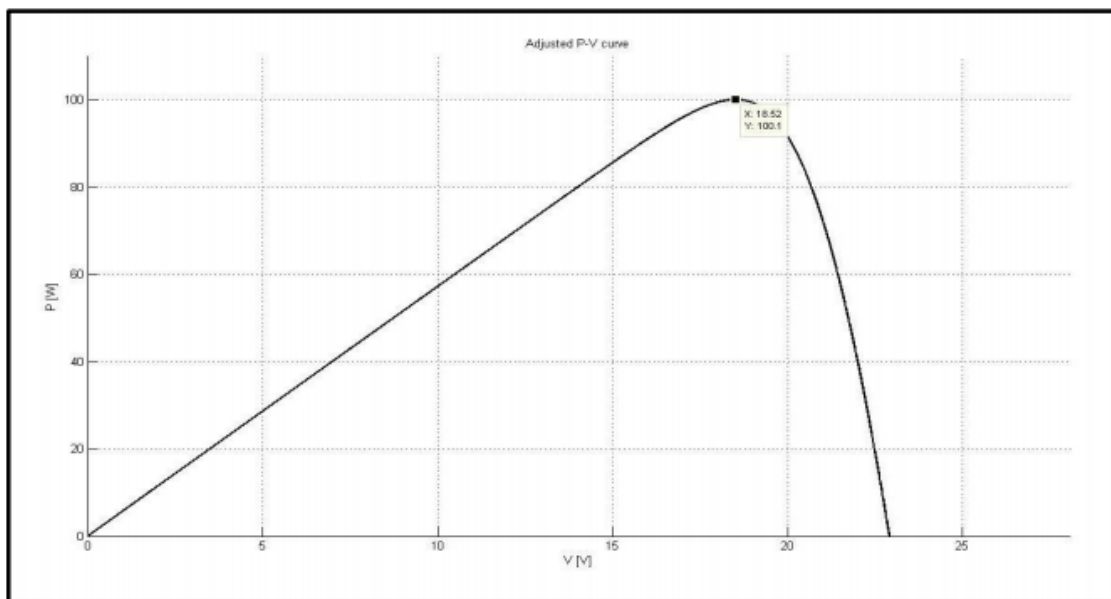
4.1.7.1 Inversor

Los inversores son convertidores DC/AC empleados para transformar la corriente producida por los módulos fotovoltaicos hacia la red eléctrica convencional. Son diseñados para seguir el punto de máxima potencia de los módulos, denominado MPPT por sus siglas en inglés. Como están conectados a la red, el modelo de inversor está diseñado para redes monofásicas o trifásicas.

Por lo que existen muchas técnicas de control empleadas para el seguimiento de punto de máxima potencia, como es el caso de la conductancia incremental, el método de lógica difusa y el método de perturba y observa. El primero se basa en un algoritmo buscando la derivada en el punto máximo, ya que matemáticamente por la función de la curva, la derivada en ese punto equivale a cero.

Figura 43

Curva de potencia del módulo fotovoltaico de la marca Jinko Solar.

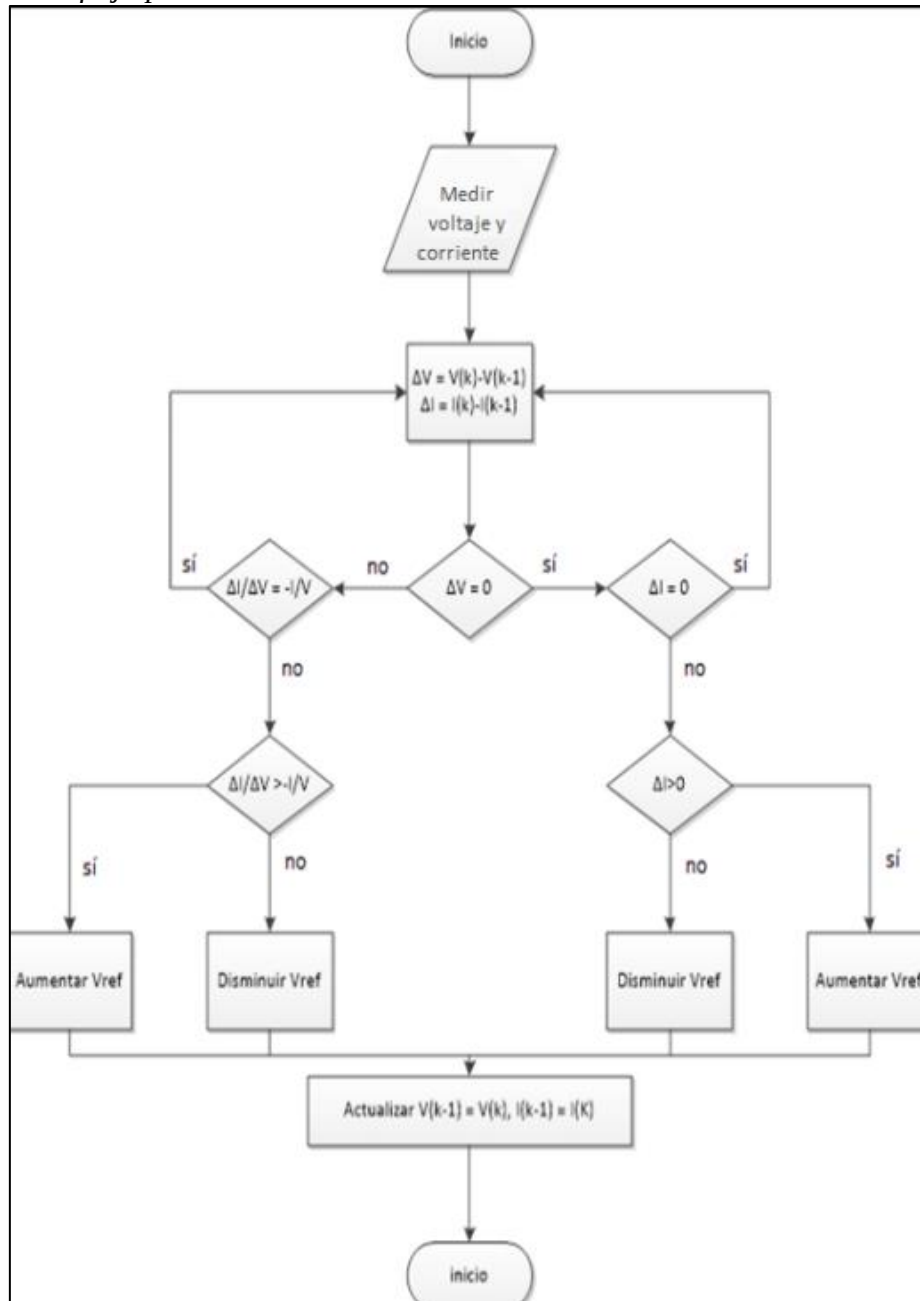


Fuente: JINKO SOLAR (2020)

En este caso, se presenta una curva con valores de potencia y voltaje. La potencia de los módulos varía con la temperatura y la irradiancia, ya que estos dos parámetros influyen en el voltaje y la corriente que produce el módulo, respectivamente. Se presenta un diagrama de flujo de este tipo de modelo para calcular la máxima potencia.

Figura 44

Diagrama de flujo para el modelo de conductancia incremental.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura mostrada anteriormente, los valores de:

- V_k : voltaje actual

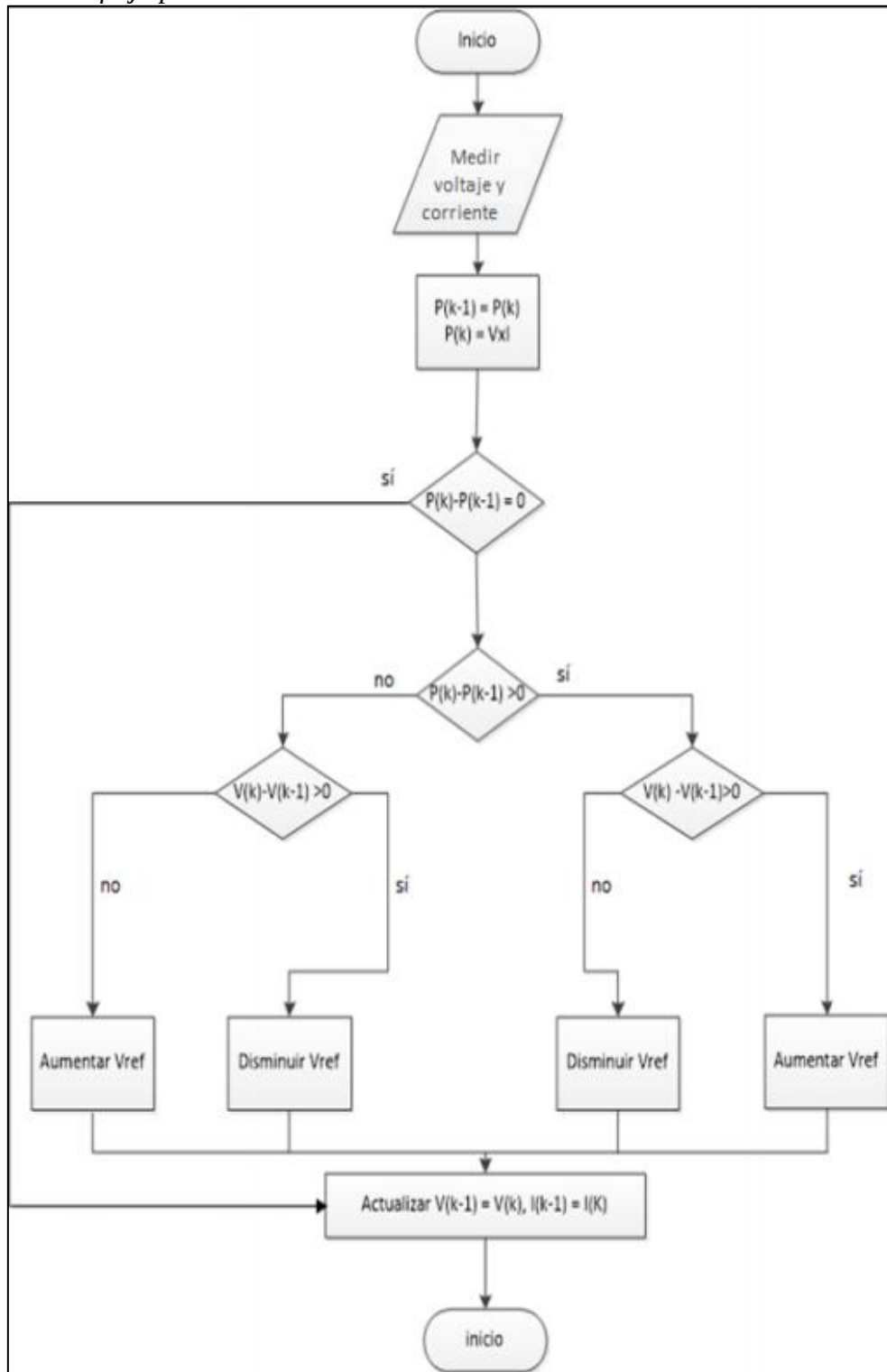
- V_{k-1} : voltaje anterior
- I_k : corriente actual
- I_{k-1} : corriente anterior
- V_{ref} : voltaje de referencia

En el caso del segundo método, denominado Perturba y Observa (P&O) se requiere de una modificación o perturbación en el valor de la tensión de entrada, es decir, se realiza una variación del voltaje buscando el incremento de la potencia, lo que afirma el acercamiento o aproximación al MPPT. Por lo tanto, es necesario medir el voltaje y la corriente de referencia para calcular la potencia máxima en ese instante, después realizar una segunda medición para corroborar que la potencia es la misma, si ese es caso, se encuentra en el punto de máxima potencia, y si no, se requiere modificar el voltaje para obtener la potencia máxima. Si en el caso, la potencia medida en el instante superior es mayor al medido en la referencia, se establece como nuevo valor de referencia.

Al igual que en el caso anterior, se muestra el algoritmo representado en un diagrama de flujo para esta metodología.

Figura 45

Diagrama de flujo para el modelo P&O.



Fuente: Elaboración propia.

Del mismo modo que el modelo anterior, se indican los valores presentados en el diagrama:

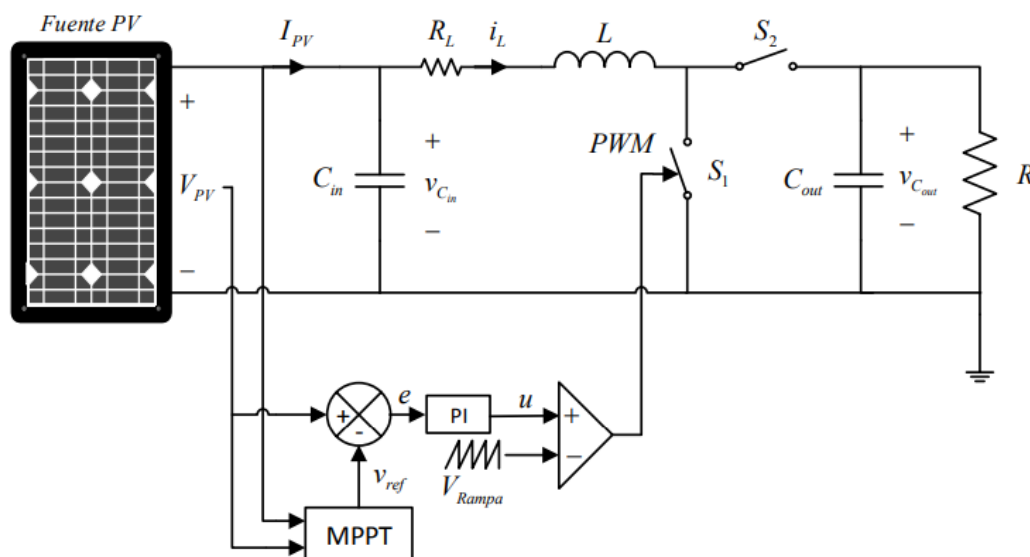
- P_k : potencia actual
- P_{k-1} : potencia anterior
- V_k : voltaje actual
- V_{k-1} : voltaje anterior
- I_k : corriente actual
- I_{k-1} : corriente anterior
- V_{ref} : voltaje de referencia

Por último, el método lógico difuso se basa en la teoría de conjunto aplicado a la electrónica, esta teoría permite representar la lengua o conjunto de conocimientos lingüísticos en valores cualitativos de modo que se convierte en un lenguaje matemático. Entonces, mediante el estudio de la lingüística y la lógica se puede modelar el comportamiento de un sistema, aunque estos no tengan un comportamiento lineal.

Un ejemplo de un sistema de control para encontrar el punto de máxima potencia, viene controlando la tensión o la corriente, por lo que existen de tres tipos de esquemas: un lazo - doble lazo de realimentación para el control de tensión y el control de corriente.

Figura 46

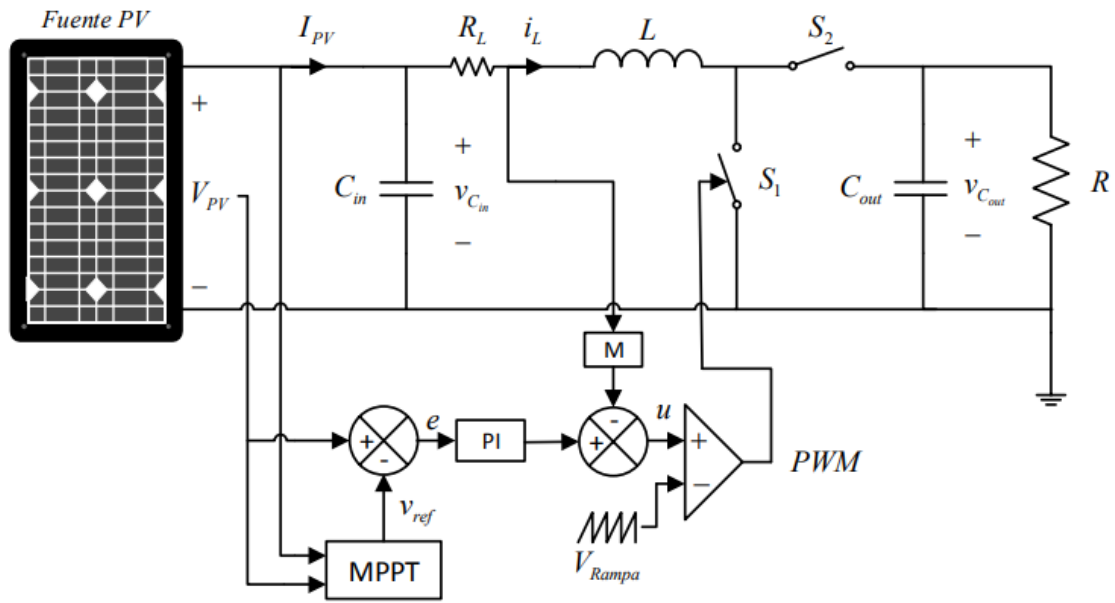
Esquema para sistema de control de tensión mediante un único lazo de realimentación.



Fuente: Jara y Ramos (2018)

Figura 47

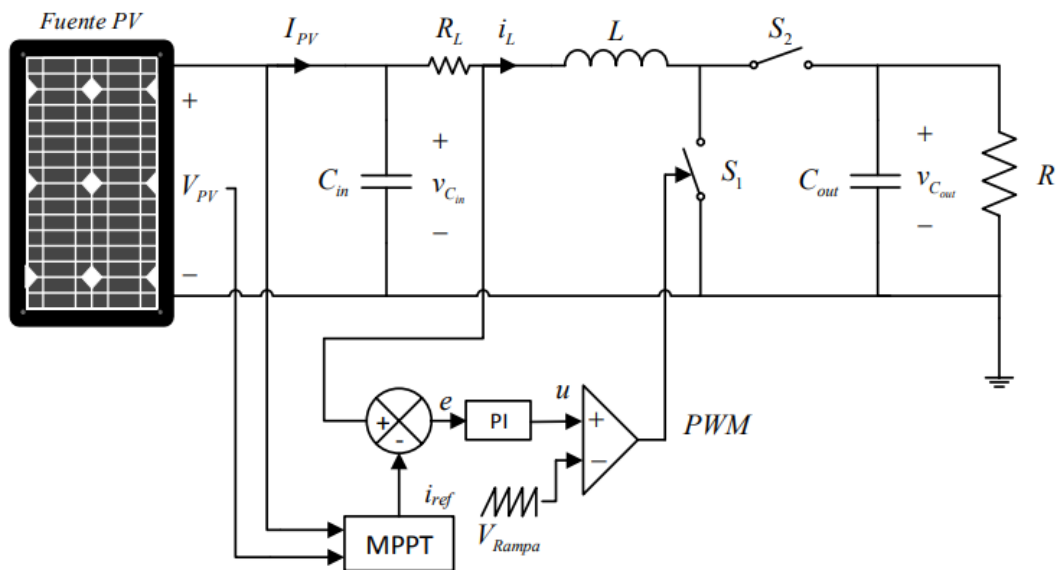
Esquema para sistema de control de tensión mediante doble lazo de realimentación.



Fuente: Jara y Ramos (2018)

Figura 48

Esquema de sistema de control de corriente.



Fuente: Jara y Ramos (2018)

4.1.7.2 Diodos de paso y bloqueo

En los sistemas fotovoltaicos, los valores de irradiancia y temperatura no son uniforme en todo el sistema, por ese motivo, los módulos producen voltajes y corrientes diferentes,

aunque la variación no es muy alta, se necesita un sistema que regule esos cambios. Para eso, se emplean los diodos y existen dos tipos: de paso y de bloqueo.

4.1.7.2.1 Diodos de paso

Estos se colocan en paralelo en asociaciones de celdas fotovoltaicas conectadas en serie para impedir que, si hubiera una celda que estuviera sombreada o con una irradiancia significativamente inferior a las demás, la corriente de las demás celdas se descargue sobre aquella celda con irradiancia menor. Por eso, a este diodo se le conoce como diodo de protección, su instalación se muestra en la figura siguiente:

Figura 49

Ubicación de los diodos de paso como elemento de un módulo fotovoltaico.

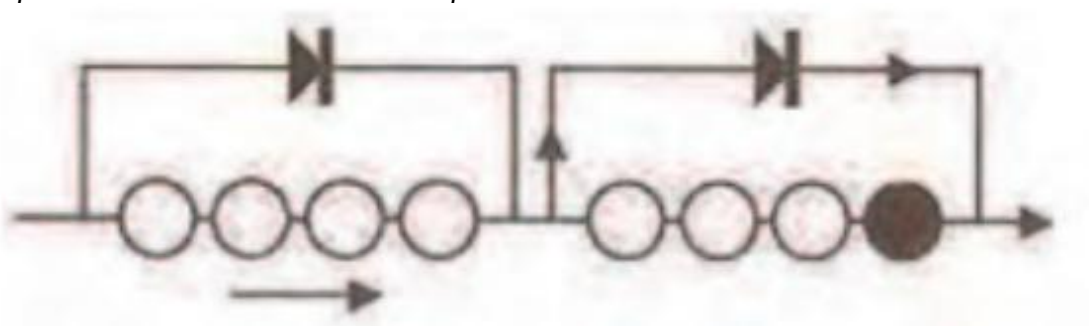


Fuente: Menéndez (2018)

El diodo se conecta con polaridad opuesta a la de las celdas fotovoltaicas, con el fin de que, si las celdas trabajan correctamente, por el diodo de paso no circula ninguna corriente eléctrica. Entonces, esta sirve para descargar la corriente que puede ir hacia una celda en la que no incide irradiancia, mientras las demás funcionan a una irradiancia promedio.

Figura 50

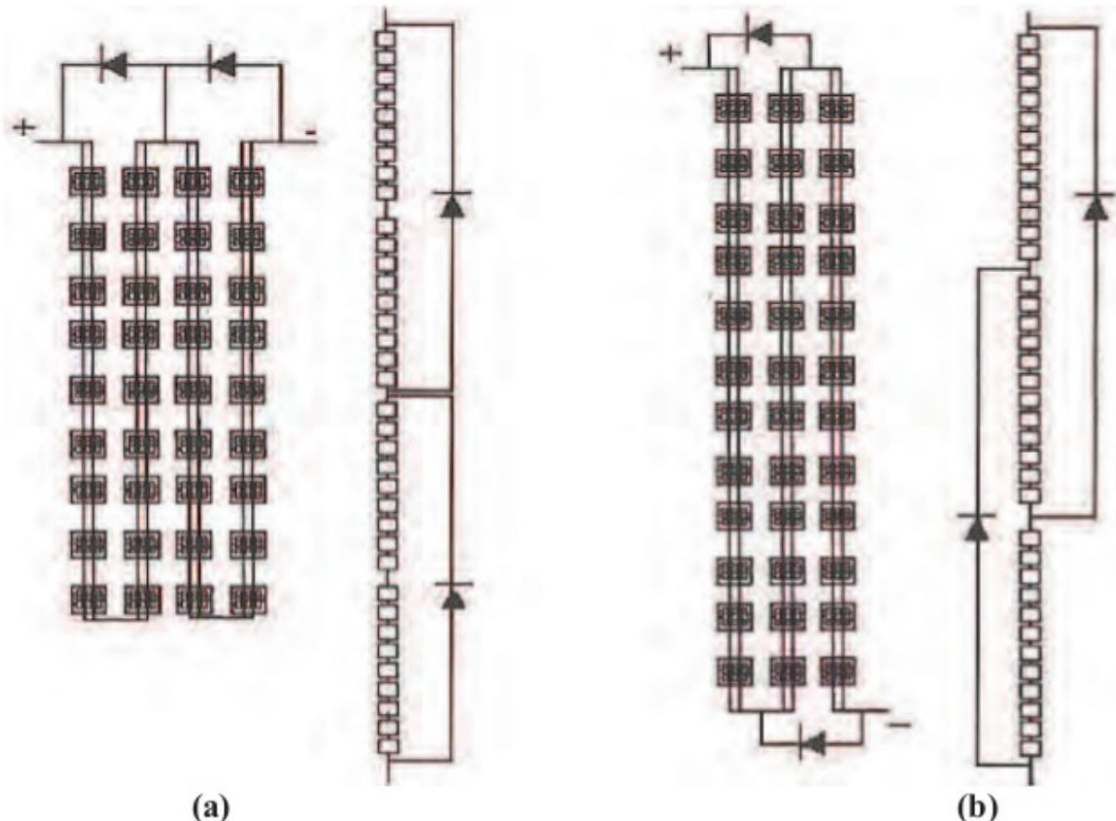
Esquema electrónico de un diodo de paso.



Fuente: Menéndez (2018)

Figura 51

Esquemas típicos de colocación o instalación de diodos de paso en un módulo fotovoltaico: a) adyacente b) superposición



Fuente: Menéndez (2018)

En las figuras anteriores, se muestran el modo de conexión de los diodos de paso, estos deben ser capaces de soportar los valores de corriente y tensión que generan las celdas conectadas en serie, mayormente el voltaje de diseño de estos es de 600 V.

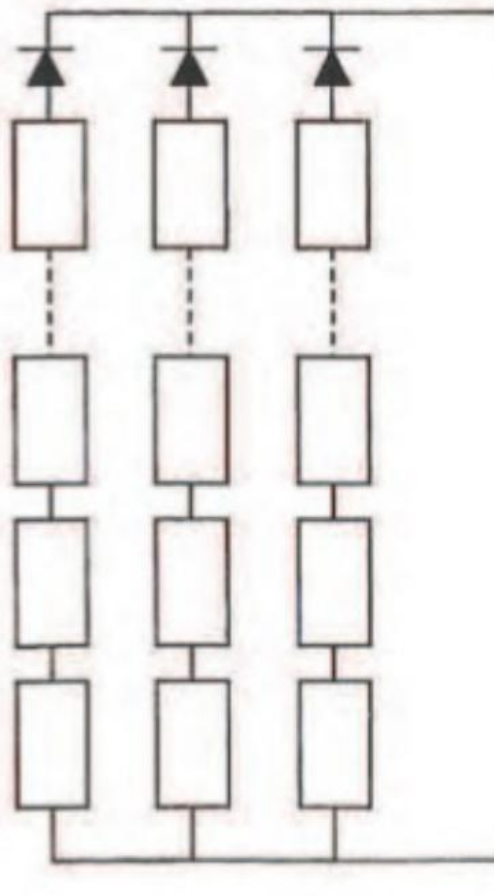
4.1.7.2.2 Diodos de bloqueo

A diferencia de los diodos de paso, estos sirven para evitar el flujo de corriente inversa hacia el módulo fotovoltaico, en inglés son denominados como “blocking diodes”. En horas de la noche, cuando no hay irradiación del sol, los módulos funcionan como resistencias y por tal motivo, consumen energía de las baterías o de la red. En otras palabras, en vez de producir un flujo de corriente hacia la red, los módulos consumen electricidad provocando un flujo de corriente inversa dirigida hacia los módulos. Para evitar esto, se emplean los diodos de bloqueo, que impiden el paso de ese flujo de corriente inversa hacia el sistema fotovoltaico.

Estos se instalan en cada rama del sistema fotovoltaico, como se muestra en la figura siguiente:

Figura 52

Configuración de los diodos de bloqueo en un módulo fotovoltaico.



Fuente: Menéndez (2018)

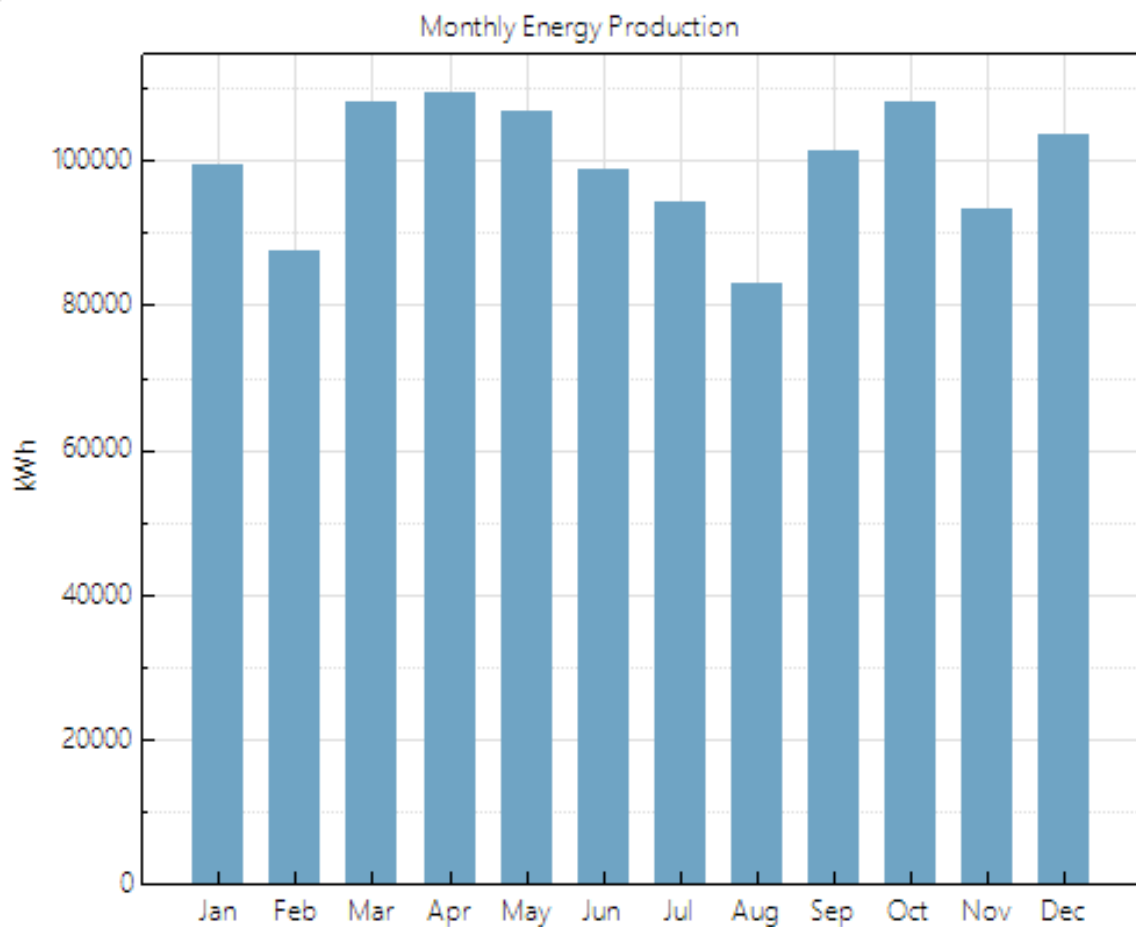
4.1.8 Energía producida

Mediante las simulaciones realizadas con SAM y Helioscope se obtuvo la energía anual producida por el sistema. Los resultados evidencian que la potencia instalada y la irradiación disponible en Lambayeque permiten obtener un desempeño energético elevado, característico de instalaciones fotovoltaicas flotantes por su menor temperatura de operación. Los valores estimados representan una referencia confiable para cargas eléctricas constantes, como las utilizadas en estaciones de bombeo, sin requerir mediciones experimentales adicionales.

En base a lo descrito anteriormente, se procede a calcular la energía total producida real del sistema, considerando las pérdidas existentes por sombreado, las pérdidas por conexión, suciedad, pérdidas en el cableado, pérdidas del inversor, etc.

Como el análisis es muy complejo y la energía producida varía en función a la temperatura, la irradiación, las pérdidas del sistema y muchos más factores, es necesario el uso de un software capaz de procesar toda esa información para obtener un dato más aproximado a la realidad. Se empleará el software SAM “System Advisor Model”, que utiliza como recurso los datos obtenidos del NREL. Mediante la simulación se obtuvo los siguientes datos:

Figura 53
Producción de Energía Mensual del Sistema Fotovoltaico.

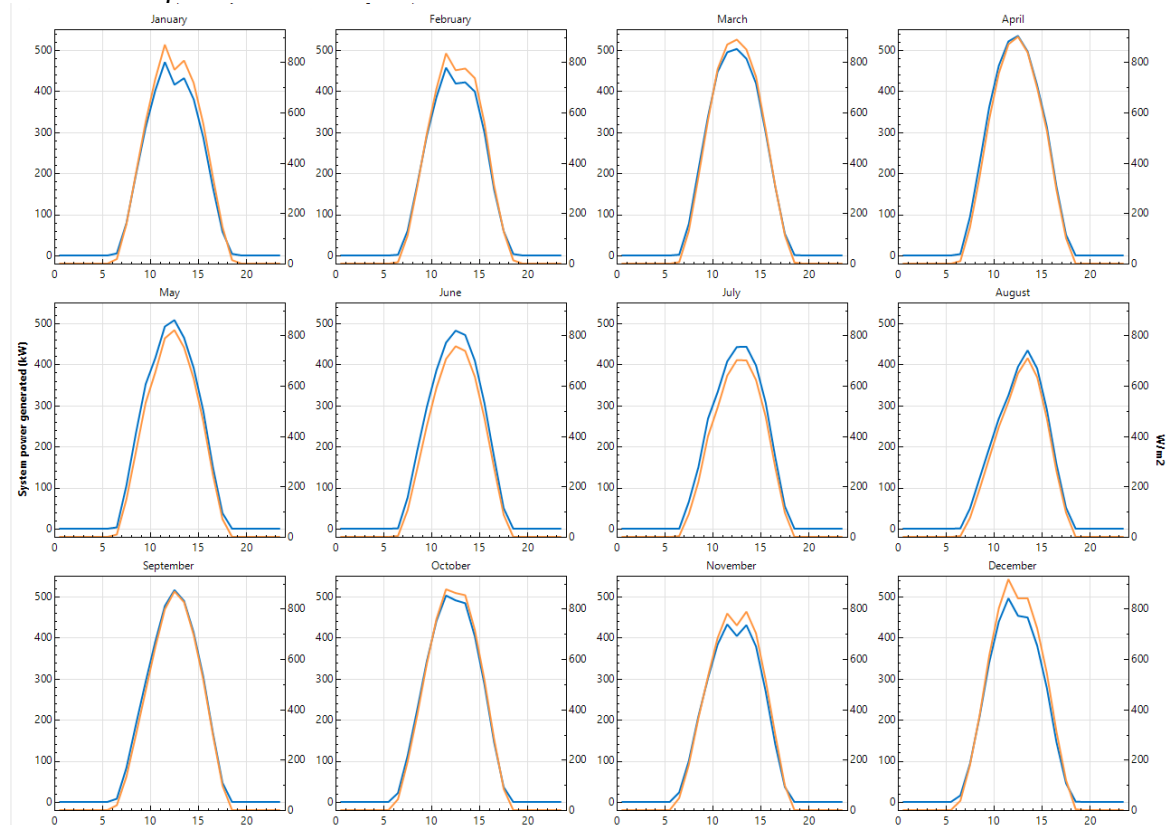


Fuente: SAM

Según la simulación, los meses de mayor producción de energía son los meses de Abril y Octubre. También tenemos la gráfica de irradiancia global (GHI) mensual de la zona, en promedio de la base de datos del NREL.

Figura 54

Irradiancia promedio obtenida de los datos del NREL vs Potencia Generada.



Fuente: SAM

De acuerdo a la simulación, los meses con mayor irradiancia son Marzo, Abril, Octubre y Diciembre. Mientras, los meses de mayor producción de energía según la gráfica de datos promedio mensual son Marzo, Abril, Septiembre, Octubre y Diciembre. Los dos meses con la producción máxima de energía coinciden con las gráficas promedios, pero cabe resaltar que la producción no depende únicamente de la irradiación, también es importante la temperatura y las pérdidas. Además, estas gráficas sirven para comparar la irradiancia y la potencia. La curva de color naranja es de irradiancia (W/m^2) y la curva azul es la potencia (kW), la línea de datos de la izquierda es para la potencia y la derecha para la irradiancia.

Figura 55
Probabilidad de producir energía (P50/P90).

	P10	P50	P90	P70.5	Min	Max	StdDev	P10-norm	P50-norm	P90-norm
Annual AC energy (kWh)	1.28219e+06	1.23573e+06	1.16477e+06	1.21265e+06	1.16332e+06	1.34599e+06	44138.1	1.29259e+06	1.236e+06	1.17942e+06
Inverter night time loss (kWh/yr)	4.4848	4.48	4.3654	4.477	4.33	4.486	0.043362	4.52314	4.46755	4.41196
Annual GHI (Wh/m2/yr)	2.20148e+06	2.12706e+06	2.01605e+06	2.08169e+06	2.00307e+06	2.30088e+06	70748.8	2.21206e+06	2.12136e+06	2.03066e+06
POA front-side irradiance total nominal (kWh/yr)	7.9604e+06	7.68088e+06	7.23389e+06	7.50805e+06	7.21714e+06	8.36813e+06	273010	8.01446e+06	7.66446e+06	7.31446e+06
POA front-side irradiance beam nominal (kWh/yr)	5.13679e+06	4.76178e+06	4.20676e+06	4.4604e+06	4.10083e+06	5.92748e+06	406776	5.27819e+06	4.7567e+06	4.23522e+06
POA front-side irradiance total after shading (kWh/yr)	7.9604e+06	7.68088e+06	7.23389e+06	7.50805e+06	7.21714e+06	8.36813e+06	273010	8.01446e+06	7.66446e+06	7.31446e+06
POA front-side irradiance total after shading and soiling (kWh/yr)	7.56238e+06	7.29683e+06	6.8722e+06	7.13264e+06	6.85628e+06	7.94973e+06	259360	7.61373e+06	7.28123e+06	6.94874e+06
POA front-side irradiance total after reflection (IAM) (kWh/yr)	7.34006e+06	7.07733e+06	6.65801e+06	6.91843e+06	6.64195e+06	7.73096e+06	257710	7.3949e+06	7.06452e+06	6.73413e+06
POA irradiance total after reflection (IAM) (kWh/yr)	7.34006e+06	7.07733e+06	6.65801e+06	6.91843e+06	6.64195e+06	7.73096e+06	257710	7.3949e+06	7.06452e+06	6.73413e+06
POA front-side irradiance beam after shading and soiling (kWh/yr)	4.87995e+06	4.52369e+06	3.99642e+06	4.23738e+06	3.89579e+06	5.6311e+06	386438	5.01428e+06	4.51887e+06	4.02346e+06
Annual DC energy nominal (kWh/yr)	1.48478e+06	1.43163e+06	1.34681e+06	1.39949e+06	1.34356e+06	1.56385e+06	52130.8	1.49587e+06	1.42904e+06	1.36221e+06
Annual DC energy gross (kWh/yr)	1.41705e+06	1.3657e+06	1.28727e+06	1.34019e+06	1.28568e+06	1.48756e+06	48780.3	1.42854e+06	1.366e+06	1.30346e+06
Annual DC energy (kWh/yr)	1.31354e+06	1.26594e+06	1.19324e+06	1.24229e+06	1.19176e+06	1.3789e+06	45217	1.32419e+06	1.26622e+06	1.20825e+06
Annual AC energy gross (kWh/yr)	1.29514e+06	1.24822e+06	1.17653e+06	1.2249e+06	1.17507e+06	1.35959e+06	44583.9	1.30564e+06	1.24849e+06	1.19133e+06
Subarray 1 Gross DC energy (kWh)	1.41705e+06	1.3657e+06	1.28727e+06	1.34019e+06	1.28568e+06	1.48756e+06	48780.3	1.42854e+06	1.366e+06	1.30346e+06
Subarray 1 DC mismatch loss (kWh)	42511.4	40971.1	38618.2	40205.7	38570.3	44626.8	1463.41	42856.1	40980	39103.9
Subarray 1 DC diodes and connections loss (kWh)	14170.5	13657	12872.7	13401.9	12856.8	14875.6	487.802	14285.4	13660	13034.6
Subarray 1 DC wiring loss (kWh)	35426.2	34142.6	32181.8	33504.7	32141.9	37189	1219.51	35713.4	34150	32586.6
Subarray 1 DC tracking loss (kWh)	7085.24	6828.52	6436.36	6700.94	6428.38	7437.79	243.901	7142.69	6830.01	6517.32
DC mismatch loss (kWh)	42511.4	40971.1	38618.2	40205.7	38570.3	44626.8	1463.41	42856.1	40980	39103.9
DC diodes and connections loss (kWh)	14170.5	13657	12872.7	13401.9	12856.8	14875.6	487.802	14285.4	13660	13034.6
DC wiring loss (kWh)	35426.2	34142.6	32181.8	33504.7	32141.9	37189	1219.51	35713.4	34150	32586.6
DC tracking loss (kWh)	7085.24	6828.52	6436.36	6700.94	6428.38	7437.79	243.901	7142.69	6830.01	6517.32
DC power optimizer loss (kWh)	7085.24	6828.52	6436.36	6700.94	6428.38	7437.79	243.901	7142.69	6830.01	6517.32
POA front-side reflection (IAM) loss (%)	3.10432	2.97157	2.88626	2.93301	2.7519	3.12755	0.0878644	3.09183	2.97919	2.86655
DC module deviation from STC (%)	4.87401	4.30858	3.98466	4.199	3.80519	5.03087	0.344699	4.85045	4.40854	3.96664
AC inverter night tare loss (%)	0.00036542	0.000353173	0.000339182	0.0003489	0.000324607	0.000376418	1.16374e-05	0.000368126	0.000353207	0.000338288
AC inverter efficiency loss (%)	1.40001	1.40001	1.40001	1.40001	1.40001	1.40001	1.67489e-07	1.40001	1.40001	1.40001
AC wiring loss (kWh)	12951.4	12482.2	11765.3	12249	11750.7	13595.9	445.839	13056.4	12484.9	11913.3
Total loss from nominal POA to net AC (kWh)	20.6432	20.2344	19.9245	20.0807	19.8178	20.8809	0.286298	20.6455	20.2785	19.9114
Performance ratio	0.800478	0.797192	0.792058	0.79543	0.791191	0.801822	0.00286297	0.800886	0.797215	0.793545
Capacity factor (%)	20.046	19.3196	18.2101	18.9587	18.1875	21.0434	0.690061	20.2085	19.3238	18.4392
Capacity factor based on AC system capacity (%)	20.9098	20.1522	18.9949	19.7757	18.9713	21.9503	0.719799	21.0794	20.1566	19.2338
Energy yield (kWh/kW)	1756.03	1692.4	1595.21	1660.78	1593.23	1843.4	60.4494	1770.26	1692.77	1615.27
Annual Energy AC pre-curtailment (year 1) (kWh)	1.28219e+06	1.23573e+06	1.16477e+06	1.21265e+06	1.16332e+06	1.34599e+06	44138.1	1.29259e+06	1.236e+06	1.17942e+06

Fuente: SAM

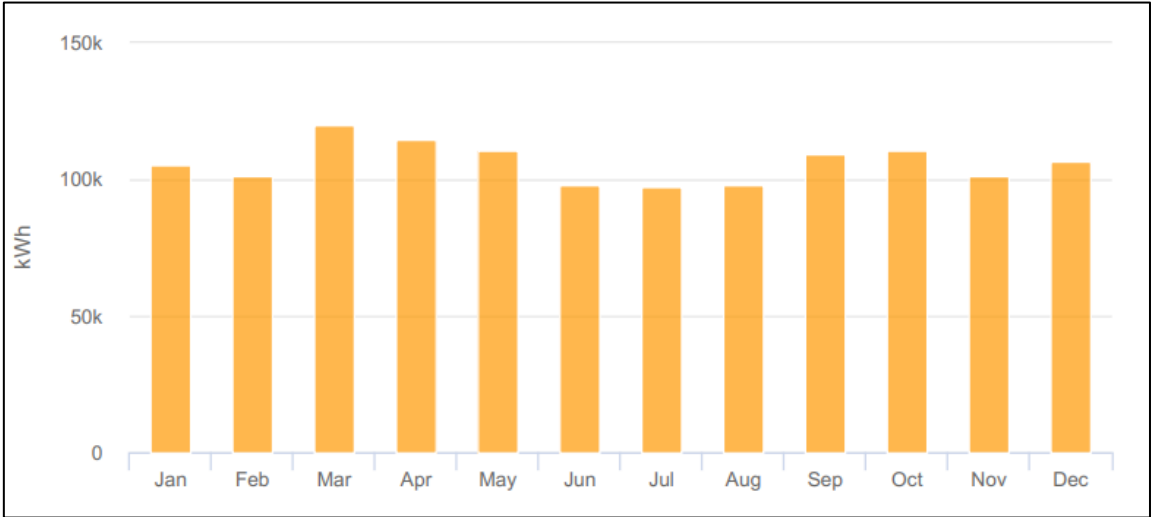
El P50 indica una probabilidad superior al 50% de producir esa cantidad de energía, del mismo modo se deduce el significado del P90. Para casos prácticos, el valor del P90 es más confiable por la probabilidad superior que representa en comparación con las demás. En base al P90 el sistema fotovoltaico es capaz de producir **1.17 GWh**.

También se utilizó el software HELIOSCOPE para simular el sistema fotovoltaico flotante, obteniendo resultados diferentes, dado que este utiliza la base de datos meteorológicos de METEORNORM y tiene otros parámetros para la simulación del sistema. Además, se tuvo que escoger un módulo fotovoltaico con propiedades parecidas al que se eligió en este proyecto, dado que, el software solo tiene una base de datos de módulos TIER 1. Para este software, se eligió el módulo JAM66S10-380/MR. La diferencia más notable con el módulo seleccionado para este trabajo son sus dimensiones, recordando que el módulo debe ser instalado encima del módulo flotante y este tiene sus limitaciones conforme a las dimensiones.

La primera diferencia se ve en la producción mensual y la energía producida total, indicándose una producción anual de 1. 274 GWh, siendo esto ligeramente mayor al obtenido en la P90 con el software SAM. Además, se obtuvieron más datos relevantes

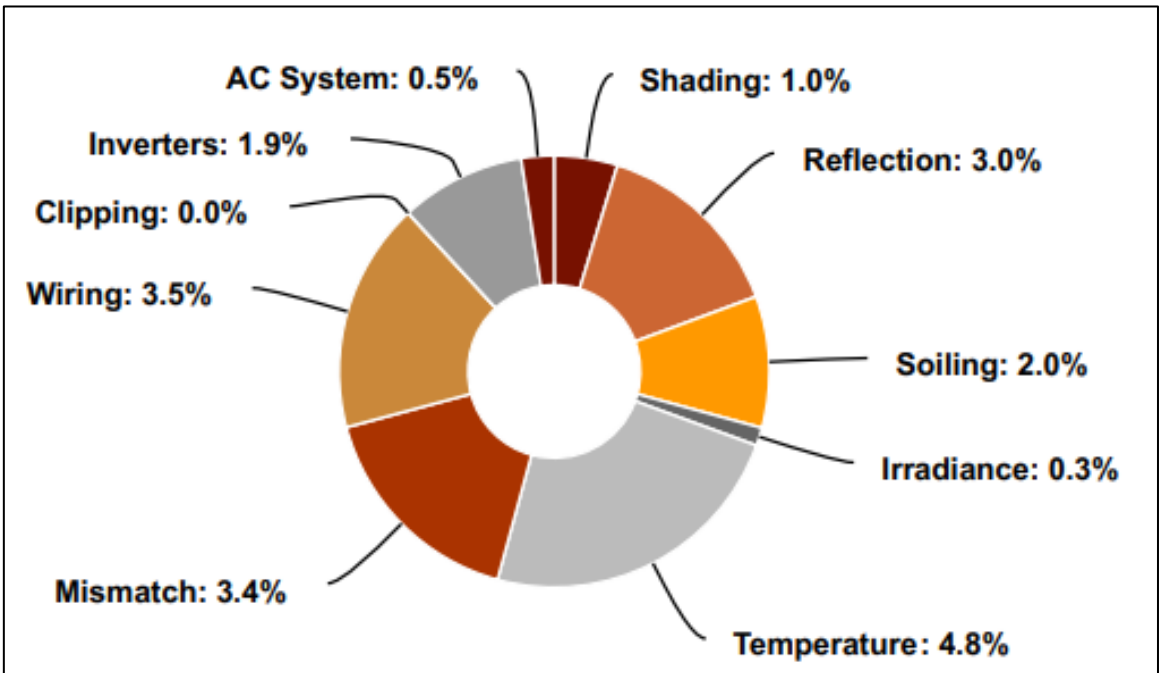
como la relación de calidad (81.4%), las fuentes de pérdidas, la varianza de la irradiación, el porcentaje de suciedad como se muestra en las figuras siguientes:

Figura 56
Producción mensual - HELIOSCOPE



Fuente: HELIOSCOPE

Figura 57
Pérdidas del Sistema - HELIOSCOPE



Fuente: HELIOSCOPE

El mes con mayor producción de energía en la simulación de HELIOSCOPE es en Marzo, la mayoría de la producción de cada mes supera los 100 MWh menos Junio, Julio y Agosto. En la otra figura podemos indicar que la mayor pérdida del sistema es por la

temperatura llegando a ser un 4.8%, seguido por las pérdidas en el cableado “wiring” con 3.5%, el acoplamiento de módulos “mismatch” con 3.4% y la reflexión 3%. Recordar que el sistema es muy grande con un total de 1920 módulos asociados en string de 20 módulos, por esta razón el cableado representa una gran pérdida, por la longitud de las conexiones.

Para visualizar mejor el potencial energético de la irradiancia y la energía obtenidas del sistema, en la figura 57 se indican las pérdidas que existen por sombreado, reflexión, temperatura de la celda y el inversor. Un dato importante es que la temperatura del ambiente no la misma para la celda, la temperatura promedio de la zona del proyecto es de 23.3°C mientras la temperatura promedio de la celda es de 32.8°C, la variación de la temperatura influye inversamente en la variación del voltaje de salida de la celda, por lo que al aumentar la temperatura disminuye su voltaje según la curva I-V.

Figura 58
Producción Anual - HELIOSCOPE

	Descripción	Salida	% Delta
Irradiancia (kWh / m ²)	Irradiancia horizontal global anual	2.127,1	
	Irradiancia POA	2.145,4	0,9%
	Irradiancia sombreada	2.124,7	-1,0%
	Irradiancia después de la reflexión	2.061,7	-3,0%
	Irradiancia después de ensuciar	2.020,5	-2,0%
	Irradiancia total del colector	2.020,5	0,0%
Energía (kWh)	Placa de nombre	1.474.292,8	
	Salida a niveles de irradiancia	1.470.258,7	-0,3%
	Salida a reducción de temperatura de celda	1.399.576,0	-4,8%
	Salida después de discrepancia	1.352.499,0	-3,4%
	Salida CC óptima	1.305.059,2	-3,5%
	Salida CC restringida	1.305.035,7	0,0%
	Salida del inversor	1.280.132,0	-1,9%
	Energía a la red	1.273.731,3	-0,5%
Métricas de temperatura			
	Promedio Temperatura ambiente de funcionamiento		23,3 ° C
	Promedio Temperatura de funcionamiento de la celda		32,8 ° C
Métricas de simulación			
	Horas de funcionamiento		4630
	Horas resueltas		4630

Fuente: HELIOSCOPE

Por ese motivo la mayor pérdida del sistema se produce por la temperatura del módulo fotovoltaico. El conjunto de condiciones que utilizó el software para realizar la simulación son las siguiente:

Figura 59*Conjunto de Condiciones del Sistema Fotovoltaico - HELIOSCOPE*

Descripción	Conjunto de condiciones 1												
Conjunto de datos meteorológicos	TMY, cuadrícula de 10 km, meteonorm (meteonorm)												
Ubicación del ángulo solar	Meteo Lat / Lng												
Modelo de transposición	Modelo Pérez												
Modelo de temperatura	Modelo Sandia												
Parámetros del modelo de temperatura	Tipo de rack		un		segundo		Delta de temperatura						
	Inclinación fija		-3,56		-0,075		3 ° C						
	Montaje empotrado		-2,81		-0.0455		0 ° C						
Suciedad (%)	J	F	METRO	UN	METRO	J	J	UN	S	O	norte	re	
	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Varianza de la irradiación	5%												
Propagación de la temperatura de la celda	4 ° C												
Rango de agrupación de módulos	-2,5% a 2,5%												
Reducción de potencia del sistema de CA	0,50%												

Fuente: HELIOSCOPE

Además, se tiene que mencionar el cableado del sistema, siendo la pérdida más importante el cableado que se tiene que realizar para conectar los 1920 módulos hacia el inversor. El arreglo fotovoltaico no está pegado a la orilla de la cámara de filtro porque existe una estructura en el lado norte de la cámara que se usa para fines de estudio del agua, por esa razón está alejado de la orilla de la cámara. En total, la longitud de cableado DC de los strings es de 17382 metros.

Figura 60
Cableado - HELIOSCOPE

Wire Schedule		
Tier	Wire	Length
Bus	3x 12 AWG	65m
String	96x 10 AWG	17382m

Fuente: HELIOSCOPE

4.1.9 Potencial Energético

Del análisis se derivó el potencial energético regional que podría lograrse al incorporar sistemas fotovoltaicos flotantes en diferentes cuerpos de agua utilizados dentro del sistema de abastecimiento hidráulico. Este potencial se expresa como referencia para la sostenibilidad eléctrica de sistemas de distribución y bombeo, cuya operación forma parte del ciclo de suministro de agua utilizado en actividades agrícolas, aun cuando no se hayan analizado variables productivas en cultivos.

Por lo tanto, en esta parte se hará un cálculo estimado de la energía que se puede obtener de los cuerpos de agua, en base a la irradiación y el área superficial de la laguna o reservorio, considerando el sistema diseñado en el capítulo anterior. Para eso, se empleará la siguiente fórmula:

$$E_{total} = IH \times N^{\circ}Días \times Superficie$$

Se calculo en base a los meses del año, con el fin de obtener una producción anual. Cabe mencionar que, este cálculo es un aproximado a la producción real, debido a que no se consideran las pérdidas del sistema ni la eficiencia de los módulos fotovoltaicos.

Tabla 8
Potencial Energético de Laguna de Collique

2019	IH	Días	Energía [kWh]
ENE	5.7	31	87376951.97
FEB	5.55	28	76844246.39
MAR	5.84	31	89523052.55
ABR	5.38	30	79811205.71
MAY	4.89	31	74960227.22
JUN	4.47	30	66311540.80

JUL	4.48	31	68675218.39
AGO	4.91	31	75266813.02
SET	5.59	30	82926512.99
OCT	5.95	31	91209274.43
NOV	5.98	30	88712083.67
DIC	5.86	31	89829638.35

Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvo que el Potencial Energético total de la Laguna de Collique es de 971.45 GWh.

Tabla 9

Potencial Energético del Reservorio Tinajones.

2019	IH	Días	Energía [kWh]
ENE	5.7	31	2841336000.00
FEB	5.55	28	2498832000.00
MAR	5.84	31	2911123200.00
ABR	5.38	30	2595312000.00
MAY	4.89	31	2437567200.00
JUN	4.47	30	2156328000.00
JUL	4.48	31	2233190400.00
AGO	4.91	31	2447536800.00
SET	5.59	30	2696616000.00
OCT	5.95	31	2965956000.00
NOV	5.98	30	2884752000.00
DIC	5.86	31	2921092800.00

Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvo que el Potencial Energético total del Reservorio Tinajones es de 31 589.64 GWh.

Tabla 10

Potencial Energético del Reservorio de Boro

2019	IH	Días	Energía [kWh]
ENE	5.7	31	96215210.32
FEB	5.55	28	84617111.96
MAR	5.84	31	98578390.93
ABR	5.38	30	87884181.92
MAY	4.89	31	82542522.54
JUN	4.47	30	73019013.61
JUL	4.48	31	75621779.34
AGO	4.91	31	82880119.77
SET	5.59	30	91314605.38
OCT	5.95	31	100435175.69
NOV	5.98	30	97685391.80
DIC	5.86	31	98915988.16

Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvo que el Potencial Energético total del Reservorio Boro es de 1 069.7 GWh.

Tabla 11*Potencial Energético del Reservoirio de Capote*

2019	IH	Días	Energía [kWh]
ENE	5.7	31	51675376.07
FEB	5.55	28	45446256.03
MAR	5.84	31	52944595.83
ABR	5.38	30	47200937.73
MAY	4.89	31	44332033.15
JUN	4.47	30	39217136.00
JUL	4.48	31	40615032.42
AGO	4.91	31	44513350.26
SET	5.59	30	49043353.52
OCT	5.95	31	53941839.93
NOV	5.98	30	52464982.83
DIC	5.86	31	53125912.94

Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvo que el Potencial Energético total del Reservoirio Capote es de 574.52 GWh.

Tabla 12*Potencial Energético de las Lagunas de Estabilización de San José*

2019	IH	Días	Energía [kWh]
ENE	5.7	31	48459349.48
FEB	5.55	28	42617899.88
MAR	5.84	31	49649579.12
ABR	5.38	30	44263378.64
MAY	4.89	31	41573020.87
JUN	4.47	30	36776450.29
JUL	4.48	31	38087348.36
AGO	4.91	31	41743053.68
SET	5.59	30	45991131.34
OCT	5.95	31	50584759.55
NOV	5.98	30	49199814.92
DIC	5.86	31	49819611.92

Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvo que el Potencial Energético total de las Lagunas de Tratamiento de Agua de San José es de 538.77 GWh.

Tabla 13*Potencial Energético de las Lagunas de Estabilización de San Pampa Perro.*

2019	IH	Días	Energía [kWh]
ENE	5.7	31	42987321.55
FEB	5.55	28	37805488.22
MAR	5.84	31	44043150.50
ABR	5.38	30	39265159.58
MAY	4.89	31	36878596.91
JUN	4.47	30	32623654.90
JUL	4.48	31	33786526.41
AGO	4.91	31	37029429.62
SET	5.59	30	40797814.51
OCT	5.95	31	44872730.39
NOV	5.98	30	43644173.66
DIC	5.86	31	44193983.21

Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvo que el Potencial Energético total de las Lagunas de Tratamiento de Agua de San Pampa Perro es de 477.93 GWh.

Tabla 14*Potencial Energético de la PTAP*

2019	IH	Días	Energía [kWh]
ENE	5.7	31	29759285.67
FEB	5.55	28	26172003.35
MAR	5.84	31	30490215.49
ABR	5.38	30	27182505.41
MAY	4.89	31	25530334.55
JUN	4.47	30	22584721.04
JUL	4.48	31	23389754.35
AGO	4.91	31	25634753.09
SET	5.59	30	28243532.58
OCT	5.95	31	31064517.49
NOV	5.98	30	30214011.59
DIC	5.86	31	30594634.04

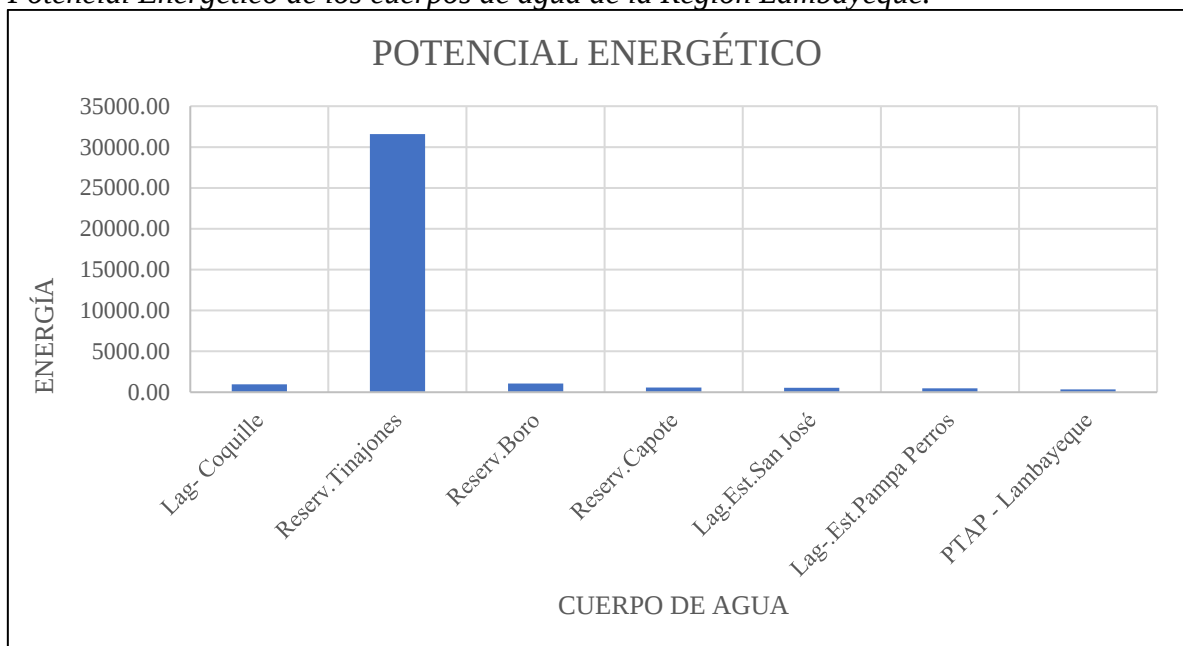
Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvo que el Potencial Energético total de la PTAP es de 330.86 GWh.

Tabla 15*Cuadro Resumen del Potencial Energético del Departamento de Lambayeque.*

CUERPO DE AGUA	SUPERFICIE [m2]	Energía [GWh]
Laguna de Collique	494493.22	971.45
Reservorio de Tinajones	16080000.00	31589.64
Reservorio de Boro	544511.66	1069.71
Reservorio de Capote	292446.95	574.52
Laguna de Estabilización San José	274246.46	538.77
Laguna de Estabilización Pampa Perros	243278.56	477.93
PTAP - Lambayeque	168417.01	330.86

Fuente: Elaboración propia.

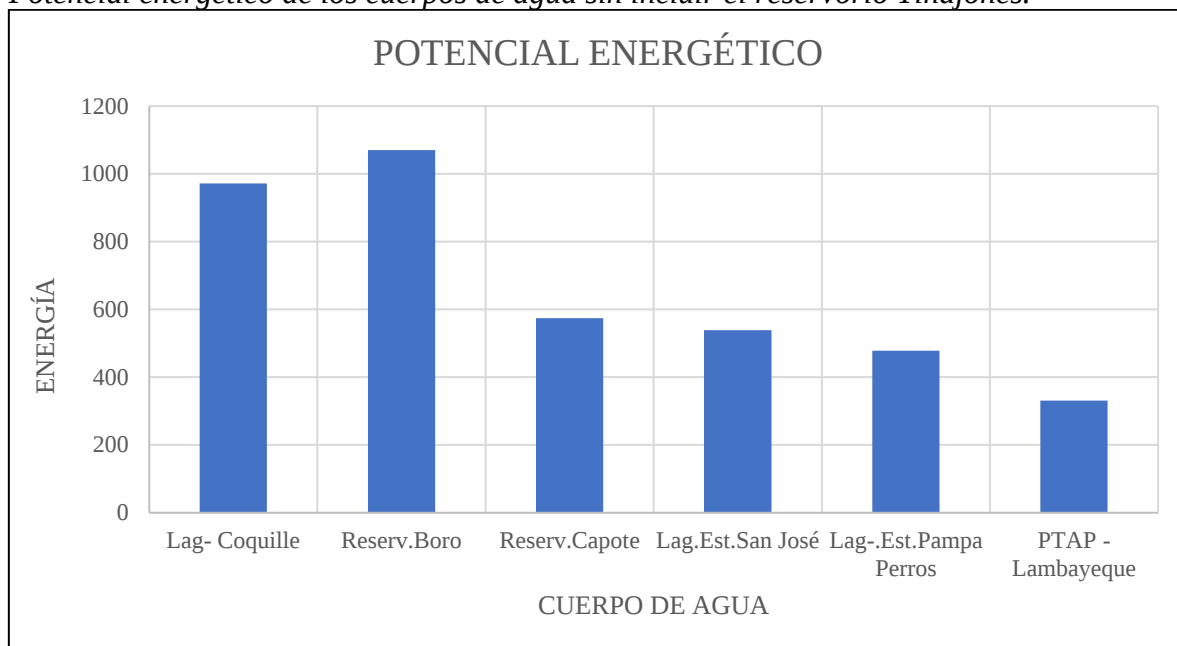
Figura 61*Potencial Energético de los cuerpos de agua de la Región Lambayeque.*

Fuente: Elaboración propia.

Indiscutiblemente, entre todos los cuerpos de agua donde se pueden instalar sistemas fotovoltaicos flotantes, el reservorio de Tinajones es que mayor potencial de energía tiene por su gran extensión. Para identificar los demás es necesario hacer el análisis sin el reservorio de Tinajones.

Figura 62

Potencial energético de los cuerpos de agua sin incluir el reservorio Tinajones.



Fuente: Elaboración propia.

La segunda mejor zona para instalar un sistema fotovoltaico flotante es el Reservorio de Boro, seguido por la laguna de Collique y el Reservorio de Capote. Como se mencionó con anterioridad, las lagunas de estabilización sería una buena opción si no fuera por su gran emisión de metano. Aunque la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Lambayeque tiene el menor potencial de todos los cuerpos de agua estudiados, es del que más se tiene datos de su sistema eléctrico y en el diseño se demostró que el sistema requiere de menos de la mitad del espacio de una de sus ocho cámaras de filtración.

El potencial energético total de los cuerpos de agua estudiados es de 35 552.88 GWh. Como se señaló a lo largo del proyecto, existen consideraciones para las instalaciones fotovoltaicas, como lo son la temperatura de la zona, la altitud, pérdida por cableado, pérdidas por sombreado, etc. También es importante considerar la eficiencia de los módulos fotovoltaicos para convertir irradiancia en energía eléctrica DC, así que no se puede estimar con precisión el potencial de generación eléctrica de cada cuerpo de agua con los datos indicados para el diseño típico del sistema en la PTAP. Para calcular el potencial de generación eléctrica de cada cuerpo de agua se tiene que realizar un estudio más detallado de cada sistema fotovoltaico flotante.

4.2 Evaluación Económica del Sistema Fotovoltaico Flotante

Para complementar el análisis técnico realizado, se efectuó una evaluación económica básica del sistema fotovoltaico flotante diseñado en la cámara de filtración de la PTAP de Lambayeque, utilizada como cuerpo de agua artificial disponible. El objetivo es estimar el costo de inversión, el costo nivelado de energía (LCOE) y comparar el resultado con la tarifa eléctrica convencional aplicada al sector agrícola en el Perú.

1. Inversión estimada del sistema

El sistema diseñado tiene una potencia instalada de **729,6 kWp** y está compuesto por 1920 módulos fotovoltaicos, flotadores Hydrelío, inversores ABB, cajas combinadoras, sistema de amarre y obra civil básica. Considerando valores referenciales de mercado:

- Módulos FV + estructura flotante + montaje: **USD 800 / kWp**
- Inversores, protecciones y balance de sistema (BOS): **USD 200 / kWp**
- Obra civil, anclajes y costos indirectos: **USD 100 / kWp**

La inversión total estimada asciende a:

$$729,6 \text{ kWp} \times 1,100 \text{ USD/kWp} = \text{USD } 802,560$$

A un tipo de cambio promedio de **S/ 3,80 por USD**, se obtiene una inversión de aproximadamente **S/ 3,050,000**.

2. Producción de energía y costo por kWh generado

El sistema producirá anualmente **1,17 GWh** (1.170.000 kWh).

Asumiendo una vida útil de **25 años**, la energía generada será:

$$1.170.000 \text{ kWh/año} \times 25 \text{ años} = 29.250.000 \text{ kWh}$$

El costo nivelado por kWh se calcula como:

$$\text{S/ } 3.050.000 / 29.250.000 \text{ kWh} \approx 0,104 \text{ S/ kWh}$$

3. Comparación con tarifa eléctrica agrícola

En el Perú, la tarifa eléctrica agrícola promedio se encuentra en **S/ 0,30 – 0,35 por kWh**.

Comparando con el costo estimado del sistema:

- **Costo sistema FV flotante:** S/ 0,104 por kWh
- **Tarifa eléctrica convencional:** S/ 0,30 – 0,35 por kWh

Esto significa que el sistema propuesto ofrece una reducción aproximada del **65% en el costo de la energía** para bombeo agrícola.

4. Beneficio económico en bombeo de agua

Considerando que la planta de tratamiento requiere un consumo energético de **1,17 GWh/año**, el gasto anual con energía convencional sería:

$$1.170.000 \text{ kWh} \times \text{S/ } 0,30 = 351.000 \text{ S/ año}$$

Mientras que, con el sistema fotovoltaico flotante, el costo nivelado sería:

$$1.170.000 \text{ kWh} \times \text{S/ } 0,104 = 121.680 \text{ S/ año}$$

El ahorro anual estimado es de **S/ 229.320**, lo cual permite un **retorno de la inversión en aproximadamente 13 años**, considerando un escenario sin subsidios.

Conclusión económica:

El sistema fotovoltaico flotante diseñado no solo es técnica y ambientalmente factible, sino también **económicamente viable**, al ofrecer un costo de generación tres veces menor que la tarifa convencional. Esto garantiza un ahorro significativo en el bombeo de agua para riego, aumentando la rentabilidad del uso agrícola en la región.

4.3 Discusión

Actualmente, el uso de energías renovables para la generación de electricidad está en un proceso de innovación constante, lo que significa que su implementación en los sistemas eléctricos ha incrementado en los últimos años y las nuevas tecnologías e investigaciones apuntan hacia el desarrollo de nuevos materiales y diseños para aumentar el aprovechamiento de estos recursos, como lo son la radiación del sol, la velocidad del viento y el flujo de agua de los ríos, mares, etc.

Los sistemas fotovoltaicos se encargan de aprovechar la radiación del sol por medio de celdas fotovoltaicas que convierten esta radiación en corriente eléctrica. En su mayoría, estos sistemas son implementados en las viviendas para reducir el consumo de energía, o en grandes zonas con irradiancia elevada para centrales fotovoltaicas, también en sistemas agrícolas para bombeo de agua y riego. Así que, la mayor cantidad de instalaciones fotovoltaicas se han instalado en tierra o superficies sólidas.

Una innovación interesante de la década pasada, fue la instalación de sistemas fotovoltaicos flotantes. Estos tienen la peculiaridad de estar ubicados encima de la

superficie de cuerpos de agua tales como lagunas, lagos y balsas de riego. Permiten reducir la cantidad de radiación que absorbe el agua, disminuyendo la temperatura sobre su capa y así disminuyendo la evaporación de agua.

Dado que, la región Lambayeque es una zona agrícola, el uso de sistemas de regadío para sus zonas de cultivo son muy empleados por los agricultores. En ese contexto, se estudió el sistema de agua del departamento, desde el reservorio de tinajones hasta el sistema de drenaje de Chiclayo, así como las derivaciones para alimentar sistemas agrícolas. Se encontró que, la mayor parte de los agricultores de la zona de Lambayeque se abastecen por medio de las plantas de estabilización, y por medio de un sistema de regadío que emplea la gravedad para distribuir el agua hacia las zonas de cultivo. Por ese motivo, para este estudio se seleccionó la planta de tratamiento de agua potable de Lambayeque, con el fin de abastecer de energía a las electrobombas que se emplean para distribuir el agua tanto a los agricultores como a los ciudadanos.

Cabe mencionar, que el proyecto Olmos-Tinajones (PEOT) promueve el desarrollo de la agricultura en el departamento por medio de la construcción de canales, centrales hidroeléctricas y construcciones que permitan el acceso al agua hacia las zonas rurales y urbanas.

Así que, el uso de sistemas fotovoltaicos flotantes en reservorios es una opción viable para el bombeo de agua en zonas cercanas o en otras plantas de tratamiento de agua potable. En el caso de las lagunas de estabilización, el problema es la cantidad de gas metano emitido por la superficie de la laguna, lo que genera un peligro para las instalaciones eléctricas del sistema fotovoltaico. Aun con las protecciones, implementar un sistema de biogás es más seguro que implementar un sistema fotovoltaico.

Aunque esta tecnología tiene más de una década en funcionamiento, aún se siguen mejorando las eficiencias de las celdas fotovoltaicas y los soportes flotantes que permiten la fijación de los módulos.

Los resultados del estudio confirman la factibilidad técnica de implementar sistemas fotovoltaicos flotantes en Lambayeque, particularmente cuando se integran a estaciones de bombeo y redes hidráulicas que requieren suministro constante de energía. El aprovechamiento de la radiación solar, junto con la estabilidad térmica del agua, permite mejorar el desempeño energético del sistema flotante en comparación con instalaciones terrestres. Además, al utilizar cuerpos de agua existentes se evita el uso de suelo agrícola

y se conservan espacios productivos. Si bien el sistema diseñado es aplicable a procesos de distribución y rebombeo vinculados al riego agrícola, la investigación no incluyó mediciones de rendimiento agroproductivo ni análisis de eficiencia del riego, dado que su finalidad fue exclusivamente energética y tecnológica. En consecuencia, los resultados deben interpretarse como un estudio de diseño con estimación energética, sin implicar evaluación directa de mejoras agrícolas en campo. La información obtenida constituye una base sólida para estudios posteriores que podrían integrar variables hidráulicas, económicas o agronómicas, si fuera necesario.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

La caracterización de los cuerpos de agua lenticos permitió identificar sus dimensiones, estabilidad y accesibilidad para la instalación de sistemas fotovoltaicos flotantes, confirmando que el potencial energético de los cuerpos de menor superficie asciende a 330.86 GWh, suficiente para alimentar cargas eléctricas constantes asociadas a estaciones de bombeo dentro del ciclo de abastecimiento hidráulico. La investigación no evaluó rendimiento de cultivos ni eficiencia agronómica porque el estudio se centró exclusivamente en la estimación energética y el diseño del sistema.

El análisis de radiación solar, temperatura y enfriamiento natural del cuerpo de agua permitió validar la factibilidad técnica de un sistema fotovoltaico flotante en Lambayeque. La disponibilidad de radiación anual, sumada al comportamiento térmico de la lámina de agua, respalda un desempeño energético constante y representa condiciones adecuadas para el diseño del arreglo flotante sin requerir superficie agrícola adicional.

La Planta de Tratamiento de Agua Potable de Lambayeque fue seleccionada como caso típico para el diseño del sistema flotante, permitiendo definir módulos, flotación, anclaje y conversión eléctrica. Entre los componentes seleccionados se incluye el flotador Hydrelío, el módulo EAGLEPERC-JKM380M-72-V-A1 y un inversor ABB de 1000 V – 630 kW, garantizando compatibilidad eléctrica y operativa para cargas asociadas a rebombeo dentro del sistema hidráulico.

La energía anual producida por el sistema diseñado en la PTAP fue estimada en 1.17 GWh/año, con una probabilidad de excedencia del 90%, obtenida mediante simulaciones con herramientas especializadas. Este valor confirma un desempeño energético estable y suficiente para alimentar estaciones de bombeo u otros equipos del ciclo de distribución hidráulica sin interferir con el uso del suelo productivo.

El potencial energético regional derivado de la instalación de sistemas fotovoltaicos flotantes en los cuerpos de agua vinculados a la distribución hidráulica en Lambayeque asciende a 35,552.88 GWh, lo cual representa una alternativa sostenible para fortalecer el suministro eléctrico asociado al abastecimiento hidráulico rural y urbano. Este resultado constituye una base técnica para futuras investigaciones que podrían integrar

variables hidráulicas, económicas o agronómicas si se considerara pertinente, manteniendo que el presente estudio se centró exclusivamente en el dimensionamiento energético.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda realizar la construcción de un prototipo flotante a escala reducida, instalado en un cuerpo de agua con monitoreo continuo, con el fin de validar experimentalmente la estabilidad del módulo, el comportamiento mecánico del sistema de anclaje, la resistencia de los flotadores y la disipación térmica natural en condiciones reales. La información obtenida permitiría contrastar los parámetros simulados con datos medidos, fortaleciendo el diseño estructural y los criterios operativos del sistema.

También sería conveniente estudiar el desempeño de diferentes configuraciones geométricas del arreglo flotante, variando el espaciamiento, la orientación, la inclinación de los módulos, así como distintas estrategias de anclaje. Este análisis permitiría identificar diseños más eficientes, resistentes y adaptables a variaciones estacionales del cuerpo de agua o a condiciones climáticas específicas.

Se sugiere integrar tecnologías de monitoreo inteligente, como sensores IoT, sistemas SCADA o adquisición de datos en tiempo real, con el propósito de evaluar temperatura del agua, degradación del módulo, vibraciones, esfuerzos en flotadores y tensión del sistema de anclaje. Este tipo de instrumentación tecnológica facilitaría el control de desempeño, la detección temprana de fallas y la optimización del mantenimiento preventivo.

Resulta pertinente analizar la durabilidad de los materiales flotantes y estructurales del sistema frente a condiciones ambientales prolongadas, como turbidez, salinidad, radiación solar, crecimiento biológico superficial y variación del nivel del agua. Esta investigación permitiría definir recomendaciones técnicas sobre vida útil, mantenimiento, recubrimientos protectores y alternativas de materiales en proyectos de mayor escala.

Finalmente, en una fase posterior, podría desarrollarse un modelo de integración tecnológica entre el sistema flotante y equipos hidráulicos reales, con evaluación de desempeño energético y automatización de rebombeo. Para ello sería necesario incorporar válvulas, sensores de nivel, controladores y algoritmos de gestión de potencia,

permitiendo estudiar la respuesta técnica del sistema bajo condiciones operativas reales sin necesidad de evaluar variables agronómicas.

REFERENCIAS

- ABB. (12 de Enero de 2021). *String Combiner 1000V DC*. Recuperado el 30 de Enero de 2021, de ABB:
<https://library.e.abb.com/public/48a47bf5b1fb4f70a81b1aad7f395648/1SLC009000D0202%20TC%20COMBINER%20RANGE.pdf>
- Alarcón Olsson, K. (2019). *Diseño de sistemas fotovoltaicos flotantes de desalación y bombeo para regadío*. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena. Recuperado el 30 de Enero de 2021, de <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/8197/tfm-ala-dis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- AUTOSOLAR. (07 de Agosto de 2019). *Paneles Solares facilitan el día a día en la laguna de Chullpía*. Recuperado el 30 de Enero de 2021, de AUTOSOLAR: <https://autosolar.pe/blog/actualidad-de-energia-solar/paneles-solares-facilitan-el-dia-a-dia-en-la-laguna-de-chullpia>
- Chávez Romero, Z. (2008). *Generación de Electricidad a partir de las Aguas Residuales de Chiclayo*. Chiclayo: Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo. Recuperado el 31 de Enero de 2021, de http://tesis.usat.edu.pe/bitstream/20.500.12423/487/1/TL_Chavez_Romero_ZaidaBrenilda.pdf
- CIEL-TERRE. (30 de Noviembre de 2020). *Hydrelío: El sistema fotovoltaico flotante patentado*. Recuperado el 30 de Enero de 2021, de CIEL-TERRE: <https://www.ciel-et-terre.net/hydrelío-floating-solar-technology/hydrelío-products/>

- DELTAVOLT. (15 de Agosto de 2018). *Radiación del Departamento de Lambayeque*. Recuperado el 31 de Enero de 2021, de DELTAVOLT: <https://deltavolt.pe/atlas/atlassolar/radiacion-departamento>
- ENERGYDATA. (31 de Enero de 2021). *Atlas Solar Global*. Recuperado el 31 de Enero de 2021, de ENERGYDATA: <https://globalsolaratlas.info/download/peru>
- EPSEL. (17 de Febrero de 2020). *Ciclo operacional del agua potable*. Recuperado el 30 de Enero de 2021, de EPSEL: <http://www.epsel.com.pe/Presentacion/WFrmServicioAP.aspx>
- EPSEL. (18 de Febrero de 2020). *Sistema de Tratamiento de Desagüe de Chiclayo mediante Lagunas de Estabilización*. Recuperado el 30 de Enero de 2021, de EPSEL: <http://www.epsel.com.pe/Presentacion/WFrmServicioAL.aspx>
- EPSEL. (28 de Enero de 2021). *Ciclo Operacional del Alcantarillado*. Recuperado el 31 de Enero de 2021, de EPSEL: <http://www.epsel.com.pe/Presentacion/WFrmServicioAL.aspx>
- Figuerola Ortiz , L., Velasquez Matienzo, E., & Valladares Morales, C. (2018). *Estudio de factibilidad de planta solar fotovoltaica en la zona sur del Perú*. Lima, Perú: Universidad Antonio Ruiz De Montoya. Obtenido de <http://repositorio.uarm.edu.pe/handle/UNIARM/2021>
- Figuerola, H., & Lard, M. (2014). *El auge de la energía solar fotovoltaica en sistemas de riego*. Piura, Perú: LORENTZ. Obtenido de <https://es.slideshare.net/Perusolar/spes-piura-2014-el-auge-del-bombeo-de-agua-solar-rev1-pdf>
- Gastelo Roque, J. (2017). Estimación de la Radiación Solar Diaria y Ángulos de Inclinación Óptimos para Lambayeque (Perú) utilizando el modelo de Hargreaves-Samani. *Revista Científica, Tecnología y Humanidades.*, I(8), 1-13.

Recuperado el 31 de Enero de 2021, de
<http://revistas.unprg.edu.pe/openjournal/index.php/revistacientifica/article/view/201/89>

Huaman Romoacca, J. (2018). *Estudio comparativo de potencia generada por paneles fotovoltaicos monocristalinos y policristalinos en la universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco*. Cusco, Perú: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco . Obtenido de
<http://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/UNSAAC/3451?show=full>

INDIAMART. (25 de Enero de 2021). *Panel solar de película fina, 1 - 10 W, 12 V*. Recuperado el 30 de Enero de 2021, de INDIAMART:
<https://www.indiamart.com/proddetail/thin-film-solar-panel-16495926562.html>

Jara Ramos, J., & Ramos Carbajal, J. (2018). *Diseño y construcción de un prototipo automatizado de un sistema de bombeo de agua para riego, pecuario y consumo humano utilizando energía fotovoltaica*. Puno: Universidad Nacional del Altiplano. Recuperado el 30 de Enero de 2021, de
<http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/6784>

JINKO SOLAR. (30 de Noviembre de 2020). *EAGLE PERC 72M-V 360-380 Watt*. Recuperado el 31 de Enero de 2021, de JINKO SOLAR:
<http://jinkosolar.com.au/wp-content/uploads/2019/03/EaglePerc-JKM360-380M-72-V-A1-EN.pdf>

Kwan Choi, Y., & Geun Lee, Y. (Noviembre de 2014). Un estudio sobre el desarrollo de una estructura giratoria para un sistema fotovoltaico flotante de seguimiento. *Revista Internacional de Ingeniería y Fabricación de Precisión.*, XV(11), 2453-2460. doi:10.1007 / s12541-014-0613-5

- LIFEDER. (31 de Enero de 2021). *¿Qué son las aguas lénticas?* Recuperado el 31 de Enero de 2021, de LIFEDER: <https://www.lifeder.com/aguas-lenticas/>
- Martín Delgado, C. (2020). *Planta fotovoltaica flotante*. Valladolid: Universidad de Valladolid. Recuperado el 30 de Enero de 2021, de <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/41616>
- Medina Muñoz, C., & Barboza Alcantara, E. (2018). *Evaluación y Análisis del funcionamiento de las Lagunas de Estabilización construidas en Localidades representativas en el departamento de Lambayeque, Periodo 2015*. Lambayeque: Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Recuperado el 31 de Enero de 2021, de <http://repositorio.unprg.edu.pe/bitstream/handle/UNPRG/5873/BC-3079%20MEDINA%20MU%C3%91OZ-BARBOZA%20ALCANTARA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Menéndez, A. (2018). *Diseño de una instalación fotovoltaica flotante para balsas de regadío*. Sevilla: Universidad de Sevilla. Recuperado el 30 de Enero de 2021, de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/71306/fichero/TFM-1306-MENENDEZ.pdf>
- Municipalidad Provincial de Lambayeque. (31 de Enero de 2021). *Lambayeque*. Recuperado el 2021 de Enero de 2021, de Municipalidad Provincial de Lambayeque: http://www.munilambayeque.gob.pe/ubicacion_geografica.php
- QSE-SOLAR. (27 de Enero de 2021). *QSE-SOLAR*. Recuperado el 30 de Enero de 2021, de QSE-SOLAR: <https://www.qse-solar.com/es/>
- Rosa-Clot, M., & Giuseppe Tina, M. (2018). *Submerged and Floating Photovoltaic Systems*. United Kingdom: ELSEVIER.
- Rosa-Clot, M., & Marco Tina, G. (2018). *Submerged and Floating Photovoltaic Systems: Modelling, Design and Case Studies*. Academic Press. Recuperado el 30 de Enero

- de 2021, de <https://www.elsevier.com/books/submerged-and-floating-photovoltaic-systems/rosa-clot/978-0-12-812149-8>
- SANDIA NATIONAL LABORATORIES. (2018). *GUIÍA para el desarrollo de proyectos de Bombeo de Agua con Energía Fotovoltaica*. Mayo. Recuperado el 30 de Enero de 2021, de https://www.itacanet.org/esp/electricidad/Guia_Bombeo_Agua_Energia_Fotovoltaica_Vol1_Libro_de_consulta.pdf
- Sandia National Laboratories. (s.f.). *Guía para el desarrollo de proyectos de bombeo de agua con Energía Fotovoltaica*. Obtenido de https://www.itacanet.org/esp/electricidad/Guia_Bombeo_Agua_Energia_Fotovoltaica_Vol1_Libro_de_consulta.pdf
- Santafé, M., Ferrer Gisbert, P., Sánchez Romero, F., Torregrosa Soler, J., Ferrán Gozávez, J., & Ferrer Gisbert, C. (2014). Implementation of a photovoltaic floating cover for irrigation reservoirs. *Journal of Cleaner Production*, 568-570. doi:10.1016/j.jclepro.2013.11.006
- Sharma, P., Muni, B., & Sen, D. (Mayo de 2015). Design parameters of 10 kW floating solar power plant. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology (IARJSET)*, 85-89. doi:10.17148/IARJSET
- Spencer, R. S., Macknick, J., Aznar, A., Warren, A., & Reese, M. O. (Diciembre de 2019). Floating Photovoltaic System: Assessing the Technical Potential of Photovoltaic Systems on Man-Made Water Bodies in the Continental United States. *Environ. Sci. Technol*, III(53), 1680-1689. doi:10.1021/acs.est.8b04735
- Tartaglia, A. (2019). *Tecnologías fotovoltaicas bifaciales: ¿vuelven para quedarse?* Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena. Recuperado el 30 de Enero de 2021, de <https://repositorio.upct.es/handle/10317/8009>

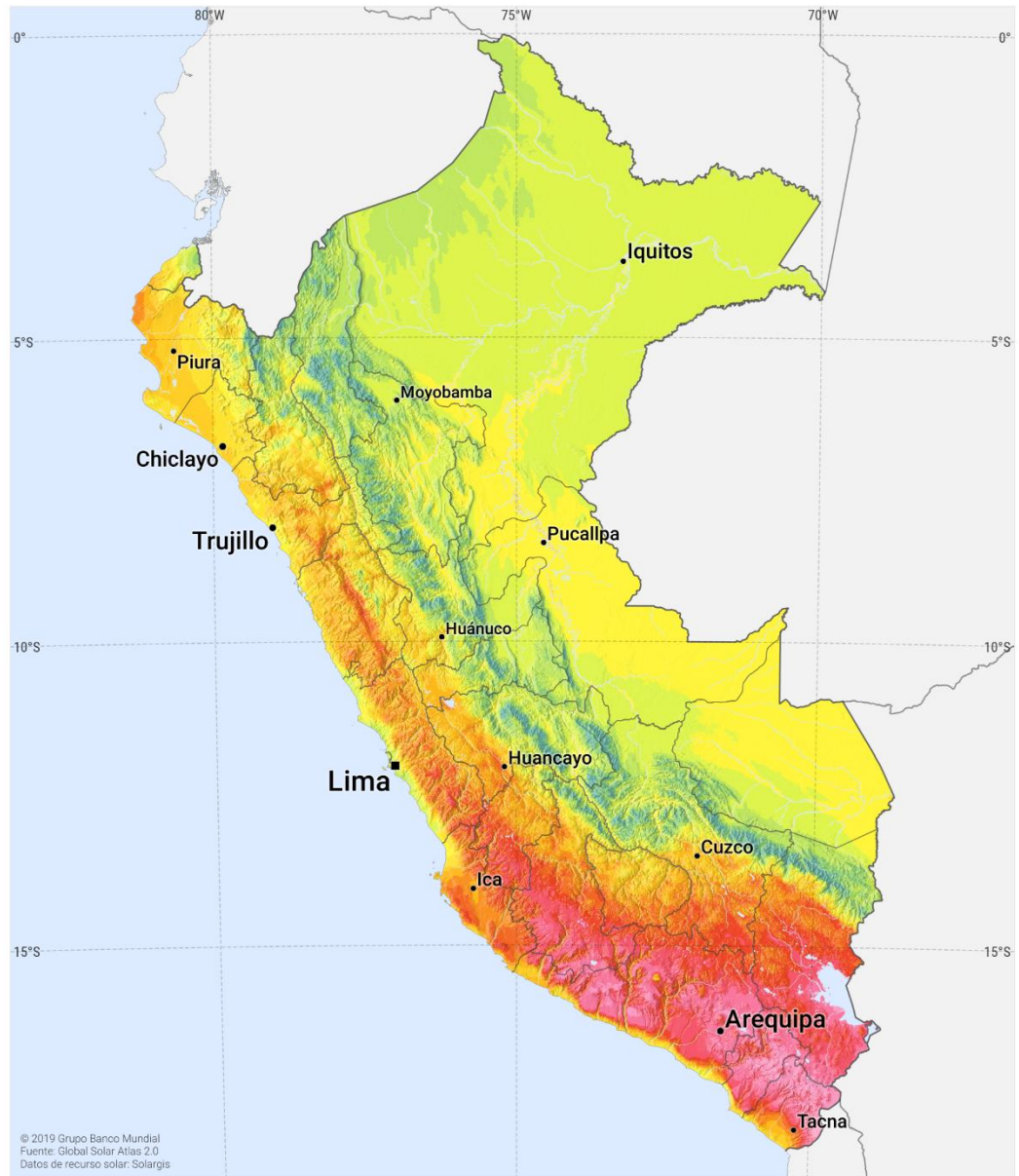
- TRACESOFTWARE. (18 de Enero de 2021). *Paneles solares bifaciales: características y ventajas*. Obtenido de TRACE SOFTWARE: <https://www.trace-software.com/es/paneles-solares-bifaciales-caracteristicas-y-ventajas/>
- Trapani, K., & Santafé, M. (2014). A review of floating photovoltaic installations: 2007-2013. *Progress in Photovoltaic: Research and Applications*, IV(23), 1-9. doi:10.1002/pip.2466
- Zambrano Cueva, J. (2020). *Sistema de bombeo de agua utilizando paneles solares en el sector Boyero - CP. Porcón Alto*. Universidad Privada del Norte. Recuperado el 30 de Enero de 2021, de <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/23578>

ANEXOS

Anexo 1: Mapa de la irradiación solar en el Perú

MAPA DE RECURSO SOLAR

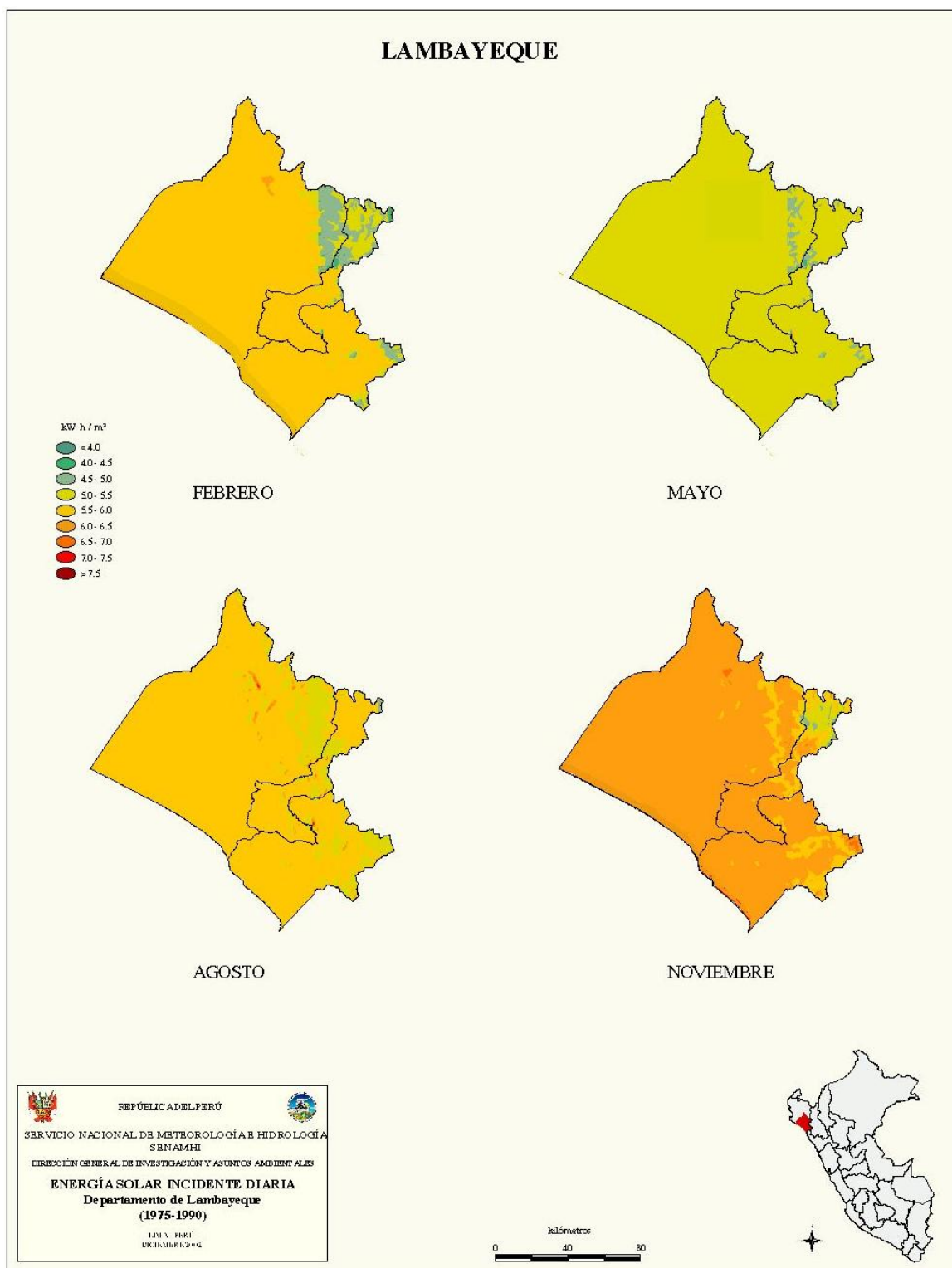
IRRADIACIÓN DIRECTA NORMAL PERÚ



Este mapa está publicado por el Grupo Banco Mundial, financiado por ESMAP, y preparado por Solargis. Para más información y términos de uso, por favor visite <http://globalsolaratlas.info>.

Fuente: ENERGYDATA (2021)

Anexo 2: Energía solar incidente diaria en el departamento de Lambayeque



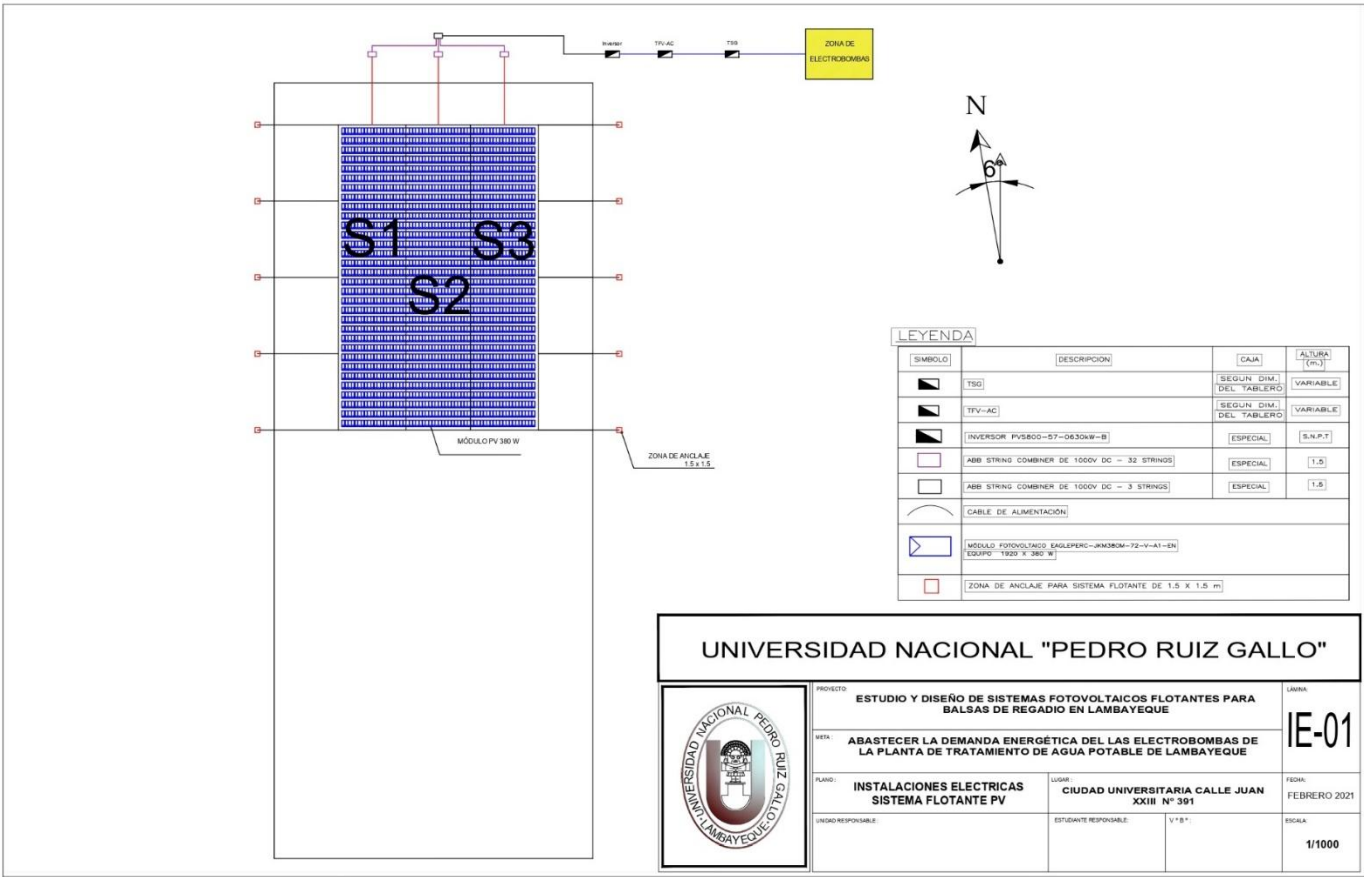
Fuente: DELTAVOLT (2018)

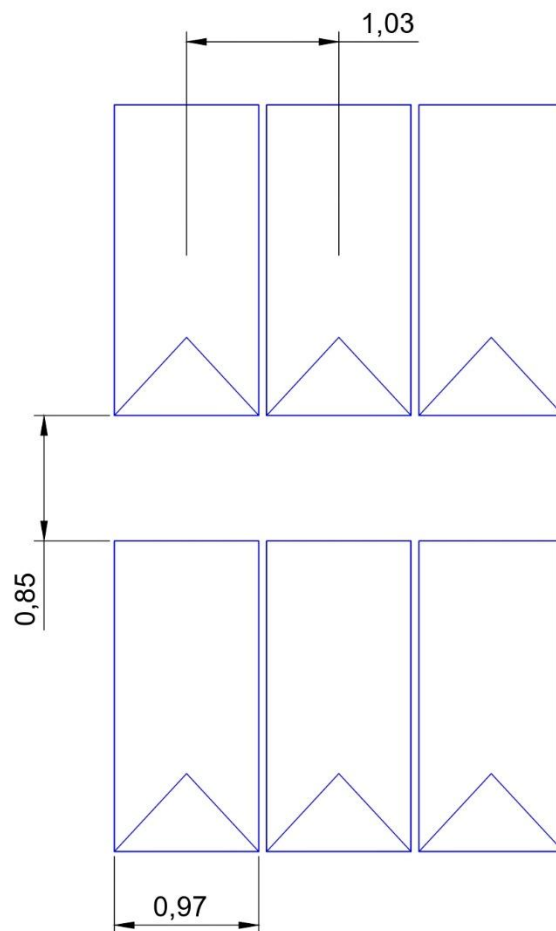
Anexo 3: Características técnicas del módulo flotante Hydrelío



Fuente: Menéndez (2018)

Anexo 4: Planos del diseño del sistema fotovoltaico flotante en la planta de tratamiento de agua potable de Lambayeque.





LEYENDA

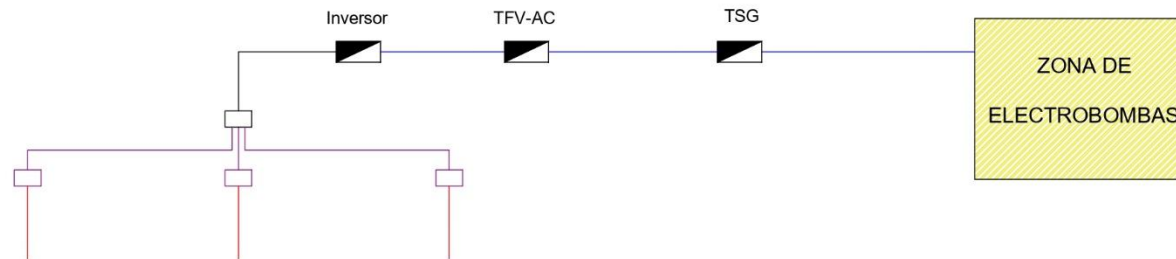
SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	CAJA	ALTURA (m.)
	TSG	SEGUN DIM. DEL TABLERO	VARIABLE
	TFV-AC	SEGUN DIM. DEL TABLERO	VARIABLE
	INVERSOR PVS800-57-0630kW-B	ESPECIAL	S.N.P.T
	ABB STRING COMBINER DE 1000V DC - 32 STRINGS	ESPECIAL	1,5
	ABB STRING COMBINER DE 1000V DC - 3 STRINGS	ESPECIAL	1,5
	CABLE DE ALIMENTACIÓN		
	MÓDULO FOTOVOLTAICO EAGLEPERC-JKM380M-T2-V-A1-EN EQUIPO 1920 X 380 W		
	ZONA DE ANCLAJE PARA SISTEMA FLOTANTE DE 1,5 X 1,5 m		

UNIVERSIDAD NACIONAL "PEDRO RUIZ GALLO"

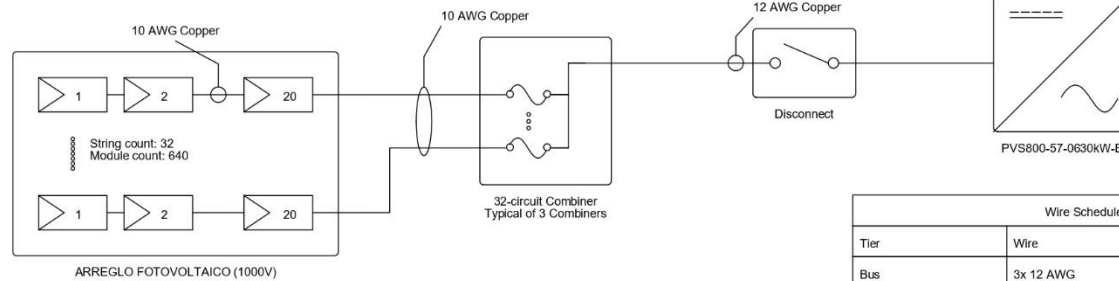


PROYECTO:	ESTUDIO Y DISEÑO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS FLOTANTES PARA BALSAS DE REGADÍO EN LAMBAYEQUE		LÁMINA:
META:	ABASTECER LA DEMANDA ENERGÉTICA DEL LAS ELECTROBOMBAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DE LAMBAYEQUE		IE-02
PLANO:	MÓDULO FOTOVOLTAICO	LUGAR: CIUDAD UNIVERSITARIA CALLE JUAN XXIII N° 391	FECHA: FEBRERO 2021
UNIDAD RESPONSABLE:	ESTUDIANTE RESPONSABLE	V°B°:	ESCALA: 1/25

ESQUEMA DE CONEXIÓN



DISEÑO ELÉCTRICO DEL SISTEMA



Wire Schedule		
Tier	Wire	Length
Bus	3x 12 AWG	65m
String	96x 10 AWG	17382m

LEYENDA

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	CAD	ALURA (m)
	TSG	SEGUN DIM. DEL TABLERO	VARIABLE
	TFCV-AC	SEGUN DIM. DEL TABLERO	VARIABLE
	INVERSOR PVS800-57-0630kW-B	ESPECIAL	S.N.P.T
	ABB STRING COMBINER DE 1000V DC - 32 STRINGS	ESPECIAL	1.5
	ABB STRING COMBINER DE 1000V DC - 3 STRINGS	ESPECIAL	1.5
	CABLE DE ALIMENTACIÓN		
	MÓDULO FOTOVOLTAICO ENLUPERC-JAMRON-72-V-A1-EN EQUIPO 1920 W 380 W		
	ZONA DE ANCLAJE PARA SISTEMA FLOTANTE DE 1.5 X 1.5 m		

UNIVERSIDAD NACIONAL "PEDRO RUIZ GALLO"



PROYECTO:	ESTUDIO Y DISEÑO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS FLOTANTES PARA BALSAS DE REGADÍO EN LAMBAYEQUE		LÁMINA:
META:	ABASTECER LA DEMANDA ENERGÉTICA DE LAS ELECTROBOMBAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DE LAMBAYEQUE		IE-03
PLANO:	CONEXIONES ELÉCTRICAS	LUGAR:	CIUDAD UNIVERSITARIA CALLE JUAN XXIII N° 391
FECHA:	FEBRERO 2021	ESCALA:	1:1820