



UNIVERSIDAD NACIONAL DE
HUANCVELICA



**FOTOCATÁLISIS SOLAR
EN LA RECUPERACIÓN
DE AGUAS GRISES
PARA LA AGRICULTURA:
INNOVACIÓN Y EFICIENCIA POR CONTROL
DE PROCESOS CON PLC S7-1500**

Hipólito Carbajal-Morán

DOI: 10.35622/inudi.b.119

Fotocatálisis solar en la recuperación de aguas grises para la agricultura: innovación y eficiencia por control de procesos con PLC S7-1500

DOI: <https://doi.org/10.35622/inudi.b.119>

Hipólito Carbajal-Morán

Universidad Nacional de Huancavelica

<https://orcid.org/0000-0002-1661-5363>

hipolito.carbajal@unh.edu.pe



UNIVERSIDAD NACIONAL DE
HUANCVELICA



Fotocatálisis solar en la recuperación de aguas grises para la agricultura: innovación y eficiencia por control de procesos con PLC S7-1500

Autor:

Hipólito Carbajal Morán

Primera edición digital

Publicado en Puno, noviembre del 2023

ISBN: 978-612-5130-09-9 (PDF)

Hecho el depósito legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2023-11195

Registro de Proyecto Editorial: N° 32101012400019

DOI: <https://doi.org/10.35622/inudi.b.119>

Categoría: Libro de resultado de investigación científica

CONSEJO EDITORIAL

Director: Lic. Sergio Antonio Flores Vargas

Editor Jefe: Eddy Rodrigo Gonzales Huaman

Editores:

Dra. Bethzabe Cotrado Mendoza / Dra. Manuela Daishy Casa Coila / Dr. Edgar Estanislao Mancha Pineda / Dra. Luz Wilfreda Cusi Zamata / MSc. Rebeca Alanoca Gutiérrez / Dr. Wilson Gregorio Sucari Turpo / Dra. Yolanda Lujano Ortega / Dra. Sheyla Lenna Cervantes Alagón / Dra. Dometila Mamani Jilaja / Dr. Peregrino Melinton Lopez Paz / Dra. Nina Eleonor Vizcarra Herles / Mg. Lourdes Antonieta López Cueva / Dr. Carlos Alfredo Castro Quispe / Dr. Edgar Darío Callohuanca Avalos / Dra. Diana Águeda Vargas Velásquez / MSc. Yésica Dominga Díaz Vilcanqui / Dra. Tania Carola Padilla Cáceres / Patty Samanta Aza Suaña / Lic. Leydi Gabriela Ramos Ramos.

Edición de:

Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú S.A.C.

Urb. Ciudad Jardín Mz. B3 Lt. 2, Puno - Perú

RUC: 20608044818

Email: editorial@inudi.edu.pe / info@inudi.edu.pe

Teléfono: +51 973668341

Sitio web: <https://editorial.inudi.edu.pe>

Universidad Nacional de Huancavelica

Av. Agricultura N° 319 - 321. Sector - Paturpampa, Huancavelica - Perú

RUC: 20168014962

Email: tramitedocumentario@unh.edu.pe

Teléfono: 067- 451551

Sitio web: <https://www.unh.edu.pe/>

Financiamiento: Universidad Nacional de Huancavelica

Publicado en Perú / Posted in Peru



Esta obra está bajo una licencia CC BY-NC-SA 4.0 DEED Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional

Evaluación de contenido: Esta obra ha sido evaluada por pares doble ciego, aprobada por el Consejo Editorial del Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú y editada bajo procedimientos que garantizan su normalización.

Los autores son moral y legalmente responsables de la información expresada en este libro, así como del respeto a los derechos de autor; por lo tanto, no comprometen en ningún sentido a la editorial.

Declaración conflictos de interés:

Los autores de esta publicación declaran la inexistencia de conflictos de interés de cualquier índole con instituciones o asociaciones comerciales.

Financiamiento:

Publicación financiada por la Universidad Nacional de Huancavelica como resultado de un concurso promovido por el Vicerrectorado de Investigación, durante el año fiscal 2023.

Información adicional:

Este libro es resultado de la tesis "Modelo de sistema de recuperación de aguas grises por fotocátalisis solar con nanopartículas de TiO₂ para riego de cultivos" presentada a la Universidad Nacional del Centro del Perú.



Director Ejecutivo

Dr. Wilson Gregorio Sucari Turpo

Director Académico

Lic. Sergio Antonio Flores Vargas

Director de Investigación

Dr. Pedro Carlos Huayanca Medina

Director de Innovación y Transferencia Tecnológica

Ing. Erika Romero Santisteban

Revisores Pares Externos

Se encuentra en el siguiente enlace:

<https://editorial.inudi.edu.pe/index.php/editorialinudi/about/editorialTeam>



EDITORIAL INSTITUTO UNIVERSITARIO DE INNOVACIÓN
CIENCIA Y TECNOLOGÍA INUDI PERÚ S.A.C.

— INDEXADA EN DOAB, DIALNET, WORLDCAT, JISC, REDIB, SCILIT, OPENDOAR, SHERPA/ROMEO—
CÓD. DE SELLO EDITORIAL.: 978-612-48813

DECLARACIÓN JURADA

El autor, abajo firmante, responsable de la investigación científica titulada **"Fotocatálisis solar en la recuperación de aguas grises para la agricultura: innovación y eficiencia por control de procesos con PLC S7-1500"**, que será publicada en la Editorial Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú, hace constar mediante la presente declaración jurada lo siguiente:

- Declaro que el libro es el resultado de una investigación científica realizada bajo mi propia dirección y supervisión, y que todo el contenido del mismo es fruto de un trabajo original y creativo.
- Afirmo que todas las ideas, teorías, conceptos, metodologías, resultados, conclusiones y cualquier otro contenido expresado en el libro son producto de mi autoría y están respaldados por los hallazgos obtenidos en la investigación, así como por la rigurosidad científica empleada en el proceso.
- Dejo constancia que se ha incurrido en plagio, es decir, no se ha copiado ni utilizado sin atribución adecuada ninguna obra, trabajo o investigación de terceros que pudiera comprometer la originalidad de los contenidos aquí presentados.
- Garantizo que cualquier cita, referencia o mención a trabajos, publicaciones o aportes de otros autores ha sido adecuadamente reconocida y citada en el texto y en la bibliografía del libro, siguiendo las normas y prácticas aceptadas en el ámbito académico y científico.
- Me comprometo a asumir la responsabilidad de cualquier controversia que pudiera surgir relacionada con la originalidad del contenido presentado en este libro y a colaborar con el Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú para resolver cualquier inquietud al respecto.
- Autorizo al Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú a publicar y distribuir el libro bajo los términos y condiciones que se acuerden, manteniendo siempre los créditos y reconocimientos a nuestra autoría.
- Reconozco que cualquier incumplimiento de estas declaraciones o de los principios éticos y académicos en la elaboración de este libro puede acarrear consecuencias legales y afectar nuestra reputación como investigadores.

HIPÓLITO CARBAJAL MORÁN
DNI: 23709147

Contribución de autores

Nombre del autor	Rol	Descripción
Hipólito Carbajal Morán	No aplica.	No aplica.

EDITORIAL INSTITUTO UNIVERSITARIO DE INNOVACIÓN
CIENCIA Y TECNOLOGÍA INUDI PERÚ S.A.C.

— INDEXADA EN DOAB, DIALNET, WORLDCAT, JISC, REDIB, SCILIT, OPENDOAR, SHERPA/ROMEO—
CÓD. DE SELLO EDITORIAL.: 978-612-48813

CONSTANCIA

de revisión por el Comité de Ética

Yo, **Lic. Leydi Gabriela Ramos Ramos** en calidad de Presidente del Comité de Ética del Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú, hago constar que el Comité de Ética de Publicación de Libros resultado de investigación científica, ha evaluado el proceso de publicación del libro titulado **"Fotocatálisis solar en la recuperación de aguas grises para la agricultura: innovación y eficiencia por control de procesos con PLC S7-1500"**, con ISBN **978-612-5130-09-9** presentado por el autor **Hipólito Carbajal Morán** y ha determinado que dicho proceso cumple con los principios éticos y las normas establecidas para la publicación de investigaciones científicas.

Del mismo modo, el informe de similitud generado por el software Turnitin arrojó los siguientes resultados:

El porcentaje total de similitud del libro es de **14%** el cual está dentro de los límites establecidos por las políticas de originalidad de nuestra institución para trabajos de investigación.

Se expide la presente para fines que los autores crean por conveniente.

Dado en Puno – Perú, 28/12/2023 15:09:24



Firmado digitalmente por RAMOS RAMOS
LEYDI GABRIELA FIR.70940654 hard
Fecha: 2023.12.28 15:48:38 -05'00'
Versión de Adobe Acrobat Reader:
2023.006.20380

Lic. LEYDI GABRIELA RAMOS RAMOS
Presidente del Comité de Ética

Contenido

SINOPSIS	12
ABSTRACT	13
PRÓLOGO	14
INTRODUCCIÓN	15

CAPÍTULO I

FOTOCATÁLISIS SOLAR Y AGUAS GRISES PARA AGRICULTURA

1.1. Fotocatálisis solar.....	19
1.1.1 Radiación solar	19
1.1.2 Radiación UV solar	27
1.1.3 Fotocatalizador solar.....	32
1.2. Aguas grises para agricultura.....	41
1.2.1 Aguas grises con carga contaminante	43
1.2.2 Características de aguas grises	44
1.2.3 Generación de aguas grises en el Perú	46
1.2.4 Aguas grises para agricultura	48

CAPÍTULO II

CONTROL DE PROCESOS CON PLC S7-1500

2.1. Control de Procesos.....	52
2.1.1 Procesos	52
2.1.2 Tipos de procesos	52
2.1.3 Control de procesos	53
2.2. PLC S7-1500 y control de procesos	54
2.2.1 Características y capacidades del PLC S7-1500.....	56
2.2.2 Programación del PLC S7-1500	74
2.2.3 Comunicación y conectividad	85
2.2.4 Aplicaciones del PLC en control de procesos	85

CAPÍTULO III

FOTOCATÁLISIS SOLAR EN LA RECUPERACIÓN DE AGUAS GRISES PARA AGRICULTURA: INNOVACIÓN Y EFICIENCIA POR CONTROL DE PROCESOS CON PLC S7-1500

3.1. Razones de la investigación	88
--	----

3.2. Objetivo de la investigación	88
3.3. Método, diseño y tipo de investigación	89
3.4. Consideraciones éticas	96
3.5. Resultados de la investigación.....	96
3.6. Discusión de resultados de investigación	100

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y REFLEXIONES

4.1. Conclusiones	107
4.2. Recomendaciones	107
4.3. Reflexiones.....	108
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	110

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Factor nubosidad y lluvias que afecta al índice UV solar</i>	30
Tabla 2 <i>Características cuantitativas de las aguas grises</i>	45
Tabla 3 <i>Descarga anual de aguas residuales domésticas sin tratamiento, en departamentos del Perú, 2017-2021</i>	47
Tabla 4 <i>Valores y rangos de los parámetros del agua para riego no restringido en agricultura</i>	48
Tabla 5 <i>Indicadores LED RUN/ERROR</i>	60
Tabla 6 <i>Indicador de estados de alimentación</i>	60
Tabla 7 <i>Indicador de estado de canales</i>	60
Tabla 8 <i>Funciones del módulo con la versión de firmware</i>	62
Tabla 9 <i>Significado de los estados del LED RUN y ERROR</i>	72
Tabla 10 <i>Indicador de estado LED PWR</i>	72
Tabla 11 <i>Indicador de estado LED CHx y COMP</i>	73
Tabla 12 <i>Valor del índice de evaluación de la calidad del agua para las muestras en los seis puntos centrales y seis puntos axiales del diseño de experimento inicial</i>	93
Tabla 13 <i>Análisis de varianza</i>	94
Tabla 14 <i>Valores de escalamiento con 04 puntos</i>	95
Tabla 15 <i>Resultado del índice de calidad de agua con 6 puntos centrales y 6 puntos axiales optimizados</i>	97
Tabla 16 <i>Análisis de varianza para las observaciones optimizadas</i>	98

Índice de figuras

Figura 1 <i>Ángulos para definir la ubicación del Sol</i>	23
Figura 2 <i>Trayectoria del día solar anual</i>	25
Figura 3 <i>Irradiancia espectral solar en la Tierra</i>	27
Figura 4 <i>Radiación UV solar con cielo despejado en los departamentos del Perú</i>	29
Figura 5 <i>Módulo para medición de radiación UV solar UVM30A</i>	31
Figura 6 <i>Relación índice UV – voltaje de salida del UVM30A</i>	32
Figura 7 <i>Inclinación del fotorreactor con respecto al Sol</i>	33
Figura 8 <i>Radiación solar reflejada en reactores cilíndricos parabólicos compuestos</i>	36
Figura 9 <i>Curvatura y ángulos de radiación en un colector cilíndrico parabólico compuesto</i>	37
Figura 10 <i>Diagrama de colector cilíndrico parabólico compuesto, aplicado a un proceso de fotocatalisis</i>	38
Figura 11 <i>Acción de TiO₂ en el agua en agua bajo la influencia de radiación UV solar</i>	40
Figura 12 <i>Clasificación de aguas grises</i>	42
Figura 13 <i>CPU y módulos del PLC S7 1500</i>	54
Figura 14 <i>Módulo de señales discretas para PLC S7 1500 DI 16x24 VDC/DQ 16x24 VDC/0.5A</i>	57
Figura 15 <i>Esquema eléctrico y asignación de conexiones</i>	58
Figura 16 <i>Direccionamiento del módulo DI 16x24 VDC/DQ 16x24 VDC/0.5A</i>	59
Figura 17 <i>Indicadores LED del módulo DI 16 x 24 V DC/DQ 16 x 24 V DC/0.5A</i> ...	59
Figura 18 <i>Módulo para medición de señales analógicas AI 8xU/I/RTD/TC ST</i>	61
Figura 19 <i>Conexión del elemento para alimentar al módulo con 24 V</i>	63
Figura 20 <i>Diagrama de conexión de terminales para medición de tensión</i>	64
Figura 21 <i>Diagrama de conexión de terminales para medición de intensidad a 4 hilos</i>	65
Figura 22 <i>Diagrama de conexión de terminales para medir intensidad a 2 hilos</i>	66
Figura 23 <i>Diagrama de conexión de terminales para medición de elementos resistivos a 2, 3 y 4 hilos</i>	67
Figura 24 <i>Diagrama de conexión de terminales para medición de termopares sin puesta a tierra</i>	68

Figura 25 Diagrama de conexión de terminales para medición de termopares con puesta a tierra	69
Figura 26 Área de direccionamiento de la memoria imagen de proceso de entradas para los submódulos 1 y 2.....	70
Figura 27 Área de direccionamiento de la memoria imagen de proceso de entradas para los submódulos 3 y 4.....	71
Figura 28 Disposición de indicadores LED para el módulo analógico AI 8xU/I/RTD/TC ST	71
Figura 29 Tarjeta de memoria SD de 24 MB para PLC.....	73
Figura 30 Programación en bloque de funciones (FBD)	75
Figura 31 Programación de escalera (KOP).....	76
Figura 32 Creación de un nuevo FC con idioma SCL.....	77
Figura 33 Creación de variables de entrada In_A y In_B, y variable de salida Output_Data en tipo Int.....	78
Figura 34 Procedimiento de la sintaxis SCL: Instrucciones y uso de variables en el programa.....	79
Figura 35 Apertura de OB1 desde el FC y colocación en la Red	79
Figura 36 Adición de las variables para In_A, In_B y Output_Data.....	80
Figura 37 Comparación entre In_A e In_B en Output_Data.....	80
Figura 38 Elementos de un diagrama Grafcet	82
Figura 39 Bloque de sensores conectados a módulo de entrada analógica del PLC S7 1500	91
Figura 40 Interface HMI y tablero de control para programar el tiempo de duración del proceso	92
Figura 41 Representación del contorno con la superficie de respuesta de los factores con optimización	98

SINOPSIS

El proceso fotocatalítico solar es una tecnología que emplea la energía del Sol para purificar aguas residuales de origen doméstico, convirtiéndolas en una fuente valiosa de recurso hídrico para la agricultura. Este libro se adentra en el estudio de la fotocatalisis solar aplicada a la recuperación de aguas grises, con un enfoque específico en su aplicación para la agricultura. El estudio tuvo como objetivo determinar los efectos de un sistema fotocatalítico solar controlado con PLC S7 1500 que permite recuperar aguas grises para su utilización en riego agrícola. El diseño experimental empleado se basó en un Diseño Central Compuesto (DCC) con tres factores (IUV, TiO₂ y Tiempo), cada uno con tres niveles; resultando en 6 puntos centrales y axiales. En total, se llevaron a cabo 20 experimentos iniciales en condiciones controladas y luego de la optimización 13 experimentos más. Los parámetros de muestreo se seleccionaron siguiendo las directrices del Estándar de Calidad del Agua (ECA) establecido para el riego de cultivos, asegurando la relevancia y aplicabilidad de los resultados en la agricultura. Para evaluar la calidad de las aguas recuperadas se empleó el método que determina el Índice de Calidad del Agua (ICA-PE%), que permite una medición precisa de la idoneidad del agua para su uso en la agricultura. Los resultados revelaron que el sistema fotocatalítico solar controlado con PLC S7 1500, logró una mejora significativa en la calidad del agua, alcanzando un índice de calidad superior al 86%. Las conclusiones de esta investigación establecen que el sistema es eficaz y tiene el potencial para proporcionar una fuente sostenible de agua de alta calidad para el riego agrícola.

Palabras clave: aguas grises, calidad del agua, PLC, riego de cultivos, sistema fotocatalítico.

ABSTRACT

Motivation drives the desire to learn, while learning strategies optimize knowledge acquisition, enhancing educational success in any context and level. The book presents a research report that aimed to determine the levels of motivation and learning strategies in university students majoring in Education at the Universidad Nacional de Huancavelica through the MSQL (Motivated Strategies for Learning Questionnaire) test. It provides the most relevant theoretical foundations of motivation and learning strategies in the university context. Additionally, the methodology used to achieve the research objective is presented. The study concluded that the majority of the analyzed students have high levels of motivation and moderate levels of using learning strategies. The most commonly used strategies include resource regulation, rehearsal, metacognitive self-regulation, time management, and study environment management, among others. These results may indicate a strong interest in learning, but with room for improvement in the effective implementation of learning strategies. It is important to focus on strengthening their learning skills and promoting the dissemination of more effective strategies for learning, such as planning, note-taking, resource utilization, and time management.

Keywords: students, learning strategies, motivation, general curriculum.

PRÓLOGO

En un mundo en constante evolución, donde los desafíos medioambientales y la seguridad alimentaria son temas cruciales, la búsqueda de soluciones innovadoras se ha vuelto más apremiante que nunca. En este contexto, la motivación de aprovechar las aguas grises para el riego agrícola se constituye como una propuesta valiosa y necesaria. Este esfuerzo no solo contribuye a la conservación de los recursos hídricos, sino que también, promueve una agricultura sostenible y reduce la presión sobre fuentes de agua potable limitadas.

No obstante, antes de que las aguas grises puedan utilizarse con confianza en el riego agrícola, es necesario abordar la cuestión de la purificación del agua. Aquí es donde entra en juego el fascinante proceso de fotocátalisis. Siendo la interrogante fundamental ¿cómo, este proceso puede ayudar a purificar el agua de manera eficaz?, esta interrogante se explorará y responderá en el contenido de este libro; que aborda la fotocátalisis solar y aguas grises para agricultura, como también; el control de procesos con PLC S7 1500. Evidenciando la ciencia detrás de la fotocátalisis aplicada a la depuración de aguas grises para el riego agrícola.

Por otro lado, no puedo dejar de expresar mi sincero agradecimiento a los responsables del laboratorio de Control y Automatización de la FIES-UNH por su apoyo con el equipamiento para cristalizar la investigación.

Se espera que este libro proporcione una visión, clara y accesible, de cómo la fotocátalisis puede marcar la diferencia en la purificación de aguas grises para el beneficio de la agricultura y, en última instancia, de nuestra sociedad. A medida que profundicemos en el tema, descubriremos cómo la innovación y la ciencia pueden unirse para abordar problemas apremiantes y abrir nuevas vías hacia un futuro más sostenible y esperanzador.

INTRODUCCIÓN

En un mundo que enfrenta desafíos ambientales cada vez más apremiantes, la gestión con sostenibilidad del agua es de prioridad global. Entre las estrategias que buscan preservar y aprovechar de manera eficiente este recurso vital, el reúso de aguas grises es una solución innovadora y prometedora para preservar el ecosistema acuático. Este libro de investigación se adentra en un tema de gran importancia en la actualidad: la recuperación de aguas grises, y destaca la importancia del uso de sistemas de control del proceso basado en el controlador lógico programable (PLC) S7-1500 de Siemens, en combinación con procesos fotocatalíticos para abordar este desafío.

El incremento de la demanda de agua dulce, junto con la creciente escasez de este recurso, ha llevado a una creciente concientización para utilizar el agua de manera más responsable y sostenible. En este contexto, las aguas grises, que son generadas en actividades domésticas como duchas, lavadoras y lavavajillas, es un recurso subutilizado que puede ser tratado y reutilizado para una variedad de aplicaciones, desde el riego en jardines hasta la recarga de acuíferos para uso en agricultura (Javadinejad et al., 2020; Samayamanthula et al., 2019).

La recuperación de aguas grises no solo contribuye a la conservación de agua dulce, sino que, también reduce la carga sobre plantas de tratamiento de aguas residuales y disminuye la contaminación de los cuerpos de agua al reducir la liberación de sustancias químicas nocivas (Murcia et al., 2014). Sin embargo, para llevar a cabo una recuperación eficaz de estas aguas, es esencial contar con tecnologías avanzadas que permitan un control preciso y una supervisión rigurosa de los procesos involucrados.

El control de procesos desempeña un papel importante en la eficiencia y efectividad de cualquier sistema que permita recuperar aguas grises. En este contexto, el PLC S7-1500 emerge como una herramienta de control industrial esencial (Daneri, 2009). Este controlador programable, desarrollado por Siemens,

ofrece una amplia gama de capacidades que lo hacen ideal para optimizar y supervisar el tratamiento de aguas grises.

El PLC S7-1500 posibilita la automatización de diversas etapas del proceso de recuperación de aguas grises, desde la recolección y filtración inicial hasta la desinfección y almacenamiento del agua tratada. Su capacidad de comunicación y su flexibilidad en la programación lo convierten en una elección preferida para los ingenieros y profesionales que buscan mejorar la eficiencia de sus sistemas de tratamiento. Este trabajo abarca los aspectos técnicos y prácticos del uso del PLC S7-1500 en la recuperación de aguas grises, mostrando estrategias de programación eficientes usando el lenguaje Grafcet e ilustra cómo esta tecnología ha transformado los procesos en todo el mundo.

Uno de los enfoques prometedores en la recuperación de aguas grises es la aplicación de procesos fotocatalíticos. Estos procesos aprovechan la luz y catalizadores para descomponer contaminantes y compuestos no deseados en el agua, transformándola en un recurso limpio y seguro para su reutilización. A lo largo de este libro, se explorará en detalle cómo la combinación de tecnología PLC S7-1500 con módulos analógicos y digitales controlando procesos fotocatalíticos puede mejorar la forma en que se aborda la recuperación de aguas grises.

Los procesos fotocatalíticos ofrecen ventajas significativas, como la degradación efectiva de contaminantes, la reducción de patógenos y la eliminación de olores y sabores desagradables en el agua recuperada. Además, son una opción amigable con el medio ambiente, ya que no requieren productos químicos dañinos y pueden operar con energía solar, lo que reduce la huella de carbono.

Este libro de investigación aborda la teoría y la tecnología detrás de la recuperación de aguas grises, así como también, la combinación de control de procesos fotocatalíticos con PLC S7-1500. Para el cual se organizó en cuatro capítulos. El capítulo I aborda la teoría de fotocatálisis solar y aguas grises para agricultura, el capítulo II aborda la teoría del control de procesos con PLC S7 1500. El capítulo III aborda el desarrollo de la investigación presentando los

objetivos, métodos, resultados de investigación y su correspondiente discusión. El capítulo IV presenta las conclusiones a las que se arribó en la investigación, recomendaciones considerar en trabajos futuros y reflexiones.

CAPÍTULO I

FOTOCATÁLISIS SOLAR Y AGUAS GRISES PARA AGRICULTURA

1.1. Fotocatálisis solar

La fotocatálisis es una tecnología innovadora que emplea la radiación UV para desencadenar reacciones químicas en diversas aplicaciones. Esta técnica combina la luz UV, que puede ser proveniente del Sol, con materiales semiconductores específicos para acelerar procesos químicos y purificar el aire y el agua de manera sostenible (Robert & Malato, 2002).

1.1.1 Radiación solar

La radiación solar representa la energía electromagnética liberada por el Sol en dirección al espacio y que alcanza la Tierra en forma de luz y calor (Iqbal, 1983). Este tipo de radiación resulta fundamental para sustentar la vida en nuestro planeta, ya que suministra la energía requerida para diversos procesos naturales, tales como el ciclo del agua, el proceso de fotosíntesis en las plantas, calentamiento atmosférico y aplicaciones en procesos de fotocatálisis.

Distancia Tierra-Sol

La Tierra se desplaza en torno del Sol en el sentido contrario a las agujas del reloj. El plano que contiene la órbita se denomina plano de la eclíptica. Una órbita tarda en completarse unos 365.25 días al año, con 1 día de 24 h, es decir, 86,400 s. La distancia existente del Sol hacia la Tierra es de una media anual de 1 unidad astronómica ($1 \text{ UA} = 1.496 \times 10^8 \text{ Km}$), varía aproximadamente un 3% a lo largo del año (Iqbal, 1983).

El plano ecuatorial de la Tierra presenta inclinación respecto al plano del eclíptico. El ángulo entre el plano ecuatorial y la línea que une el Sol a la Tierra representa la declinación; variando a lo largo del año entre -23.45° y $+23.45^\circ$; el tiempo está estrechamente relacionado con el ciclo solar; la órbita terrestre alrededor del Sol y la declinación solar definen el año, las estaciones astronómicas y los meses (Livanov, 2023). Los equinoccios de marzo y septiembre son los puntos en la órbita donde la declinación solar es cero. Los solsticios de junio y diciembre son los puntos donde la declinación alcanza sus extremos; el invierno boreal (en el hemisferio norte) y el verano austral (en el hemisferio sur)

comienzan en el solsticio, es decir, entre el 20 y el 22 de diciembre; el verano boreal y el invierno austral comienzan en el solsticio de junio, es decir, entre el 20 y el 22 de junio; las primaveras y otoños boreales, respectivamente otoños y primaveras australes, comienzan en los equinoccios de marzo entre el 19 y el 21, y septiembre entre el 21 y el 24 (Goddard, 2022).

El movimiento rotatorio terrestre en referencia al Sol define el día solar medio, dividido en 24 h de 60 min cada una, o 3,600 s cada una; la hora solar media es tal que, como media anual, el Sol está en el punto más alto cuando la hora solar media es igual a las 12:00; dependiendo de la longitud; una diferencia de 1 h corresponde a una diferencia de 15° de longitud (SENAMHI, 2003). La hora solar verdadera es aquella en la que el Sol está en su punto más alto cuando la hora solar es igual a las 12:00 cada día; la diferencia entre la hora solar y la media está en función del número de días del año; el máximo es igual a 0.276 h (≈ 17 min) y se alcanza alrededor del 31 de octubre; el mínimo es de -0.242 h (≈ 15 min) y se alcanza en torno al 13 de febrero (Pérez, 2019).

Irradiancia solar

La radiación solar representa a la energía electromagnética producida por el Sol, se propaga por el espacio hasta llegar a la Tierra (Chiron & Cachorro, 2008). Esta energía es esencial para mantener la vida en el planeta tierra y es fuente primaria de energía para una variedad de procesos artificiales y naturales, incluyendo el clima, la fotosíntesis en las plantas, generación de energía solar y procesos fotocatalíticos (Carbajo, 2013).

La irradiancia solar se refiere a la cantidad de energía proveniente del Sol que llega a una determinada área, en un tiempo dado, se mide en watts por metro cuadrado (W/m^2); la irradiancia solar varía según la localización geográfica, la hora del día, las condiciones del clima y la época del año (Leckner, 1978). Es importante para evaluar la potencia de energía solar en un lugar específico y para comprender cómo la radiación solar afecta a la temperatura, intensidad luminosa y otros procesos en la Tierra. Además, al considerar las aplicaciones de la irradiancia solar, es importante tener en mente las variaciones en los rangos de

longitudes de onda (λ) que pueden ser bastante distintas en diferentes contextos; cuando el Sol se encuentra en el punto más alto en un día despejado, la irradiancia solar directa en la superficie terrestre es aproximadamente 1,050 vatios por metro cuadrado (W/m^2) (SENAMHI, 2003).

La magnitud de la energía irradiada por el Sol que llega a la Tierra varía de manera inversa y proporcional a la distancia elevada al cuadrado entre la Tierra y el Sol. La Tierra sigue una órbita elíptica alrededor del Sol, con el Sol ubicado en uno de los focos de la elipse. La Tierra se ubica más cerca al Sol alrededor del 3 de enero, siendo la distancia de aproximadamente 0.983 Unidades Astronómicas (UA), y alcanza su punto más alejado alrededor del 4 de julio, a una distancia de aproximadamente 1.017 UA (Iqbal, 1983).

A partir de la distancia Tierra-Sol, que es de aproximadamente $r_0 = 1.496 \times 10^8$ Km, se calcula un factor de corrección (según la ecuación 1) para determinar la excentricidad de la órbita terrestre E_0 , mediante la fórmula: $\left[E_0 = \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \right]$. Este factor de corrección nos permite estimar la distancia, r , en un día específico utilizando series de Fourier, con un margen que no supera el 0.01% (Spencer, 1971).

$$E_0 = 1.00011 + 0.034221\cos\Gamma + 0.00128\text{sen}\Gamma + 0.000719\cos 2\Gamma + 0.000077\text{sen} 2\Gamma \quad (1)$$

El ángulo diario Γ (medido en radianes) es determinado mediante la fórmula de la ecuación 2, considerando un día cualquiera n , que varía de 1 a 365, asumiendo que febrero tiene siempre 28 días. Sin embargo, es importante indicar que, en el transcurso de 4 años, la fórmula de Γ necesitará un pequeño ajuste.

$$\Gamma = \frac{2\pi(n - 1)}{365} \quad (2)$$

La declinación, denotada como " δ ", corresponde al ángulo generado por la intersección de la línea que va desde el centro de la Tierra hacia el Sol con el ecuador terrestre, este valor experimenta cambios constantes a lo largo del año,

oscilando desde $+23^{\circ} 27'$ en los solsticios de verano llegando a hasta $-23^{\circ} 27'$ invierno para el hemisferio norte, y de manera opuesta para el hemisferio sur, alcanzando un valor de cero en los equinoccios; la declinación δ experimenta un cambio aproximado de 0.5 grados en un período de 24 horas (Spencer, 1971); como se describe en la ecuación 3 para su cálculo.

$$\begin{aligned} \delta = & 0.006918 - 0.399912\cos\Gamma + 0.070257\text{sen}\Gamma + 0.006758 \cos 2\Gamma \\ & + 0.000907\text{sen}2\Gamma + 0.002697 \cos 3\Gamma \\ & + 0.00148\text{sen}3\Gamma \end{aligned} \quad (3)$$

La medición del tiempo solar se logra gracias a la rotación de la Tierra en torno a su eje inclinado y alrededor del Sol. Esto se debe a que un día solar no tiene precisamente una duración de 24 horas, debido a la forma elíptica de la Tierra y la inclinación de su eje en relación a la eclíptica; resultando en una diferencia de más de 16 minutos; para ajustar esta discrepancia, se utiliza la ecuación del tiempo (Spencer, 1971), que se presenta en la ecuación 4.

$$\begin{aligned} E_t = & 2.2918 (0.0075 + 0.1868\cos\Gamma - 3.2077\text{sen}\Gamma \\ & + 1.4615\cos2\Gamma - 4.089\text{sen}2\Gamma) \end{aligned} \quad (4)$$

El Sol se mueve a lo largo de su trayectoria a un ritmo de alrededor de 15 grados, lo que significa que los meridianos son divisiones de 15 grados. La ecuación 5 se utiliza para calcular la Hora Solar Verdadera (HSV), la cual está vinculada a la Hora Local Estándar (HLE).

$$HSV = HLE + 4 (L_l - L_s) + E_t \quad (5)$$

L_s es la longitud del meridiano referencial, mientras que L_l corresponde a la longitud del lugar. HLE se calcula tomando en cuenta la diferencia entre la hora local y cualquier ajuste de horario de verano o retraso.

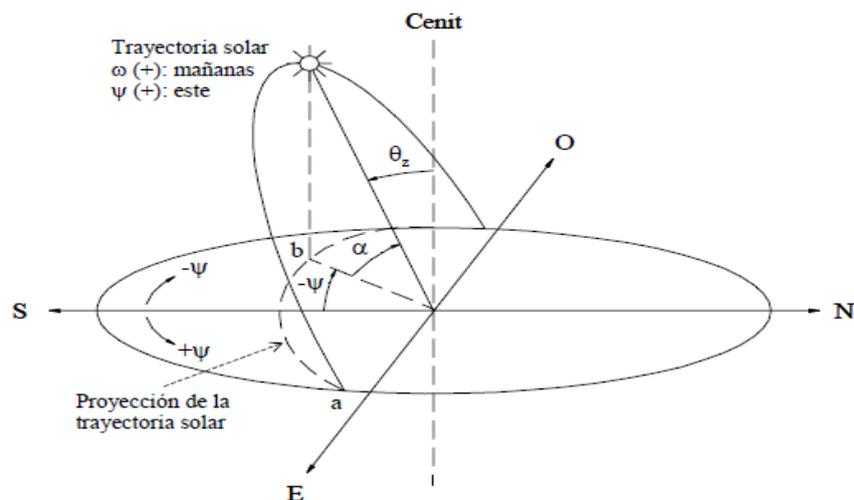
Para calcular la ubicación del Sol, se emplean fórmulas matemáticas considerando un observador en la Tierra que se toma como el punto central del sistema de coordenadas, bajo la suposición de que la Tierra permanece estática

(Mendoza, 2013). El cenit corresponde al punto situado de manera vertical justo sobre el observador. Mientras que el meridiano del observador se extiende de manera imaginaria desde los polos Norte hasta los polos Sur, y está en este punto ubicado el observador. La línea vertical que atraviesa la posición del Sol en un instante particular se denomina el meridiano solar (Mendoza, 2013).

La posición solar se determina a partir de dos ángulos: el cenital θ_z y el azimutal ψ . Estos ángulos son esenciales para definir el plano formado por los meridianos del observador y los del Sol (como se ilustra en la Figura 1). Además, se consideran otros dos parámetros importantes: elevación solar y ángulo horario. El ángulo de elevación solar α , se forma entre la dirección del Sol y el horizonte del observador, y se calcula como $\alpha = 90 - \theta_z$. En cambio, el ángulo horario (ω) se determina en referencia al polo Norte, el meridiano del observador y el meridiano solar. El valor de ω comienza en 0 al mediodía solar y aumenta en incrementos de 15 grados por cada hora que transcurre. Es positivo en la mañana y negativo en la tarde (Mendoza, 2013).

Figura 1

Ángulos para definir la ubicación del Sol



Nota. Adaptado de *An introduction to solar radiation* (p. 16) por Iqbal (1983). Fuente: Citado en Carbajal-Morán (2021).

La ubicación solar para un lugar de latitud φ , se obtiene mediante la ecuación 6 y ecuación 7.

$$\cos\theta_z = \text{sen}\delta \text{sen}\varphi + \cos\delta \cos\varphi \cos\omega = \text{sen}\alpha \quad (6)$$

$$\cos\psi = \frac{\text{sen}\alpha \text{sen}\varphi - \text{sen}\delta}{\cos\alpha \cos\varphi} \quad (7)$$

El ángulo cenital es representado por θ_z , δ representa la declinación, φ indica la latitud, ω representa al ángulo horario, α denota la altura del Sol, y ψ se relaciona con el azimut (Iqbal, 1983). Cuando el Sol sale, θ_z es igual a 90° , lo que posibilita hallar la hora del amanecer utilizando las ecuaciones 8 y 9.

$$\cos\omega_s = -\text{sen}\varphi \text{sen}\delta \cos\varphi \text{sen}\delta \quad (8)$$

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan\varphi \tan\delta) \quad (9)$$

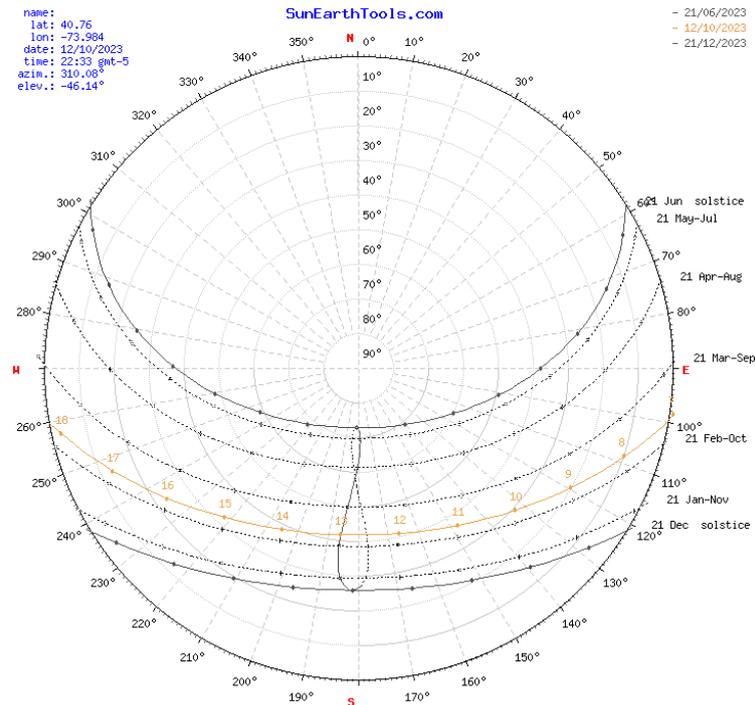
Los ángulos de aparición y puesta del Sol tienen magnitudes equivalentes, pero opuestos en dirección, y la duración del día equivale al doble de la magnitud de cualquiera de estos ángulos (Mendoza, 2013); se describe mediante la ecuación 10.

$$N_d = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan\varphi \tan\delta) \quad (10)$$

El día solar más corto ocurre en junio, mientras que en enero es más extenso, como se ilustra en la Figura 2. Con el software simulador SunEarthTools (2023), se evidencia de forma gráfica los solsticios; en los meses de junio y diciembre, así como en los equinoccios, se produce un evento en el que el Sol se encuentra en línea recta sobre el ecuador. Esto conlleva a que el día y la noche tengan una duración igual en ambos hemisferios.

Figura 2

Trayectoria del día solar anual



Nota. Obtenido con el simulador SunEarthTools.com (2023). **Fuente:** Citado en Carbajal-Morán (2021).

Radiación solar en la superficie terrestre

La radiación constante fuera de la atmósfera se denota como I_0 y cambia según la ecuación 11.

$$I_0 = I_{CS} \left[1 + 0.034 \cos \left(360 \frac{n}{365.25} \right) \right] = I_{CS} E_0(n) \quad (11)$$

I_0 representa la constante solar mientras que n el número de día. Ignorando los efectos atmosféricos, podemos encontrar la irradiancia solar directa que incide en superficie horizontal mediante la ecuación 11, que se multiplica por el valor de coseno del ángulo cenital θ_z , como se definió en la ecuación 6. Esto nos lleva a obtener la ecuación 12.

$$I_0 = I_{CS} E_0(n) \cos \theta_z \quad (12)$$

Por lo tanto, la irradiancia obtenida por m^2 en un pequeño intervalo de tiempo dt se expresa de la siguiente manera:

$$dI_0 = I_{CS} E_0(n) [\text{sen}\delta \text{sen}\varphi + \text{cos}\delta \text{cos}\varphi \text{cos}\omega] dt \quad (13)$$

Dentro de la ecuación 11, la constante solar I_{CS} tiene como unidades $kJm^{-2}h^{-1}$; ω se cuantifica en radianes, y el tiempo se transforma en ángulo horario mediante la utilización de la ecuación 14.

$$dt = \frac{12}{\pi} d\omega \quad (14)$$

Al realizar la integración de la ecuación 14 y reemplazar ω por ω_i , se encuentra la ecuación 15.

$$I_n = I_{CS} E_0(n) \left[\text{sen}\delta \text{sen}\varphi + \frac{24}{\pi} \text{sen}\left(\frac{\pi}{24}\right) \text{cos}\delta \text{cos}\varphi \text{cos}\omega_i \right] \quad (15)$$

si:

$$\frac{24}{\pi} \text{sen}\left(\frac{\pi}{24}\right) = 0.9972 \approx 1 \quad (16)$$

Entonces, al llevar a cabo la integración de la ecuación 13 desde el amanecer hasta el atardecer, se calcula la radiación diaria, lo que nos conduce a obtener la ecuación 17.

$$I_d = \frac{24}{\pi} I_{CS} E_0(n) \left[\frac{\pi}{180} \omega_s (\text{sen}\delta \text{sen}\varphi + \text{cos}\delta \text{cos}\varphi \text{cos}\omega_s) \right] \quad (17)$$

La radiación incidente en superficies con inclinación se ajusta hacia el Ecuador con un ángulo β , lo cual es descrito en la ecuación 18 (Iqbal, 1983).

$$I_{d\beta} = I_d R_\beta \quad (18)$$

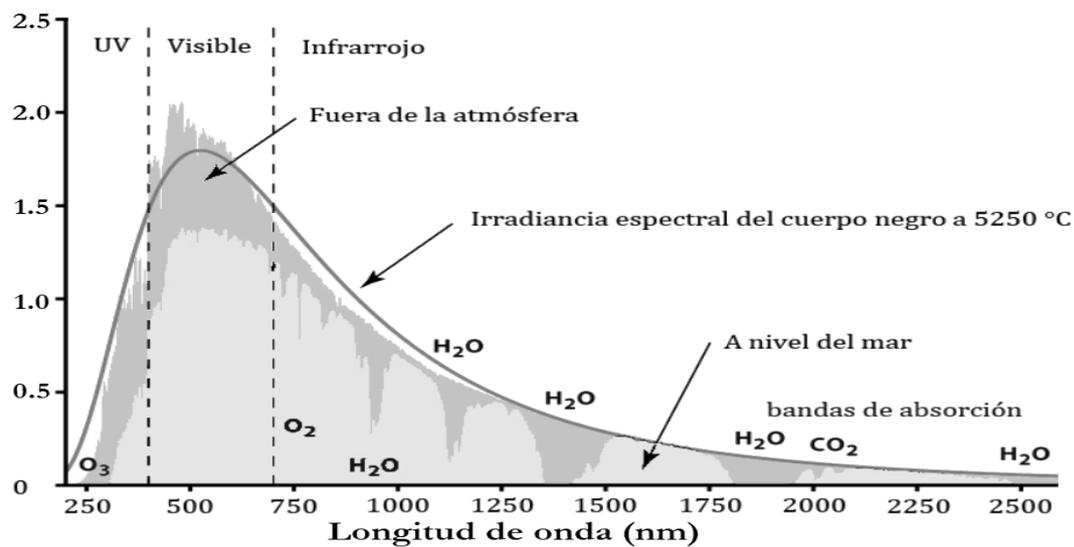
R_{β} se trata de un factor de transformación que se encuentra definido en la ecuación 19. ω_s representa el ángulo orto del Sol, δ corresponde a la declinación solar y φ indica la latitud del lugar.

$$R_{\beta} = \frac{\omega_s \text{sen} \delta \text{sen}(\varphi - \beta) \text{sen} \omega_s}{\omega_s \text{sen} \delta \text{sen} \varphi + \text{cos} \delta \text{cos} \varphi \text{sen} \omega_s} \quad (19)$$

La energía se reduce significativamente al pasar a través de la atmósfera (ver Figura 3), y estas ecuaciones nos posibilitan calcular la cantidad de energía disponible en la Tierra para su aprovechamiento en procesos fotocatalíticos.

Figura 3

Irradiancia espectral solar en la Tierra



Nota. Obtenido de *Irradiación solar* por ECyT-ar (2017) **Fuente:** Citado en Carbajal-Morán (2021).

1.1.2 Radiación UV solar

La radiación ultravioleta (UV) es una componente del espectro electromagnético de la irradiancia solar, se divide en tres categorías según su λ , siendo esta más corta que la luz visible (Chiron & Cachorro, 2008):

UVA (Ultravioleta A): Se encuentra en λ de aproximadamente 320 a 400 nm (Chiron & Cachorro, 2008). El UVA es la forma de radiación UV menos energética

y está presente durante todo el día, incluso en días nublados. Puede contribuir al envejecimiento de la piel y al daño celular.

UVB (Ultravioleta B): Se encuentra en λ de aproximadamente 280 a 320 nm. El UVB es más energético que el UVA y es responsable de causar quemaduras solares (Chiron & Cachorro, 2008). La radiación UVB solar se emplea en fotocátalisis, el cual es un proceso químico que involucra la radiación ultravioleta B del Sol para desencadenar reacciones químicas en la superficie de ciertos materiales o sustancias, ya que este tipo de radiación activa fotocatalizadores, que son sustancias que aceleran las reacciones químicas al absorber energía UVB y transferirla a las moléculas circundantes.

UVC (Ultravioleta C): Se encuentra en λ de aproximadamente 100 a 280 nm (Chiron & Cachorro, 2008), esta radiación, debido a su alta energía, es absorbida en su gran mayoría por la atmósfera terrestre, lo que impide que llegue a la superficie de la Tierra.

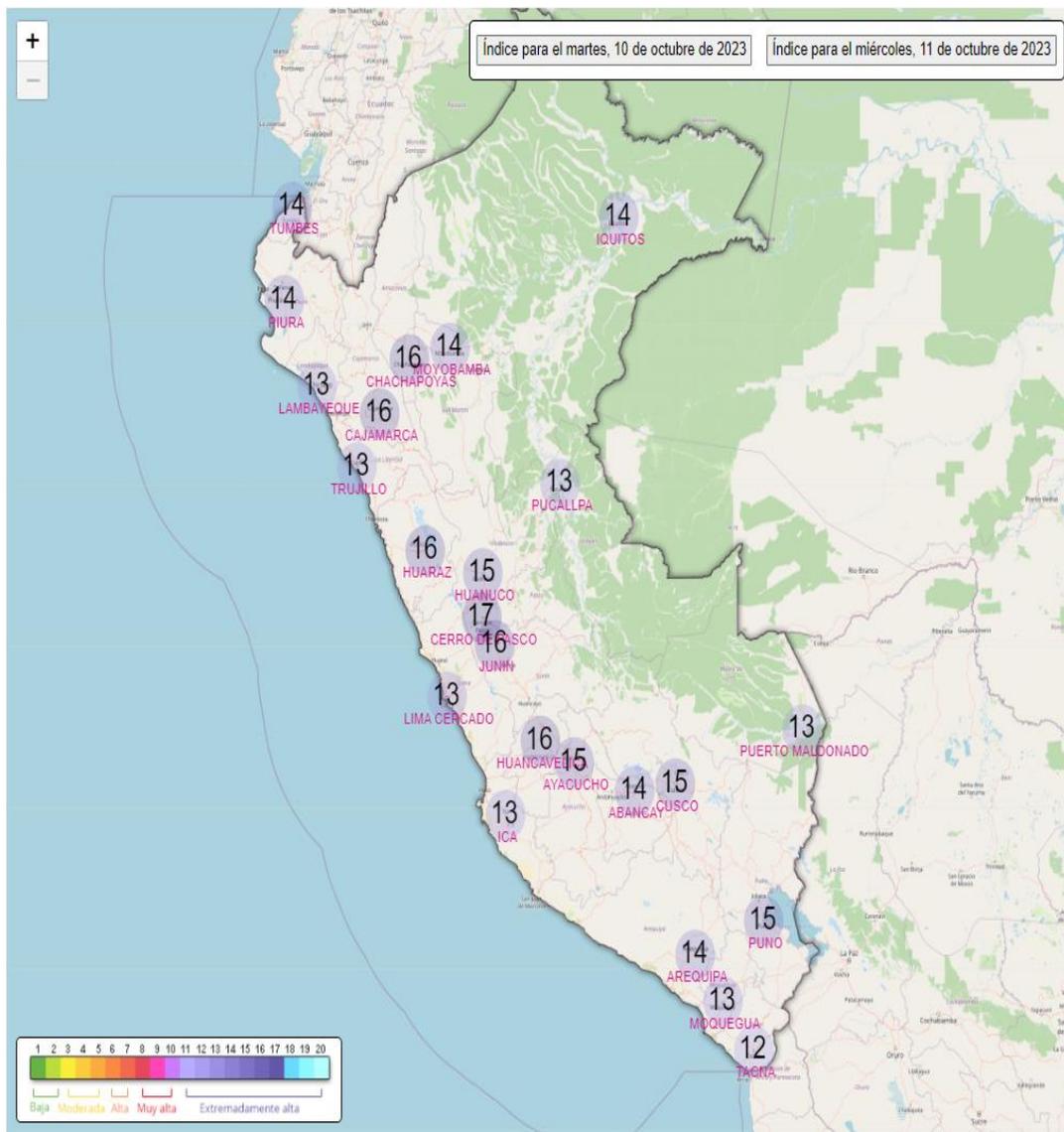
La radiación UV global (UVG): Se refiere a la cantidad total de radiación UV emitida por el Sol en todas las λ dentro del rango UV que llega a la Tierra en un período de tiempo determinado, esta medida representa la suma de las radiaciones UVB y UVA que llegan a la superficie terrestre (Nahim et al., 2018). La radiación ultravioleta solar total es importante en varios contextos, incluyendo la salud humana, la protección solar, la meteorología y la investigación científica.

La cantidad de UVG es dependiente de la ubicación geográfica, hora del día, condiciones climáticas y las épocas del año. Por ejemplo, en días despejados y al medio día solar, la UVG tiende a ser más alta, lo que alcanza el pico de radiación UV. En la investigación medir la radiación UVG fue fundamental para comprender los patrones de radiación solar, sus efectos y aplicaciones en fotocátalisis sobre la superficie terrestre. Se utilizan instrumentos especializados, como espectrofotómetros UV, para medir y registrar la intensidad de la radiación UV global solar en diferentes ubicaciones y condiciones.

La radiación solar en los departamentos ubicados en la franja de la sierra del Perú presenta un alto índice UV el cual está directamente relacionado con la altitud. De la Figura 4, estos índices de radiación UV llegan hasta 17 en Cerro de Pasco; 16 en Chachapoyas, Cajamarca, Junín y Huancavelica, mientras que en la costa bordea alrededor de 13, al igual que en la selva.

Figura 4

Radiación UV solar con cielo despejado en los departamentos del Perú



Nota. Imagen de índices UV obtenida para el 11 de octubre de 2023 de SENAMHI (SENAMHI, 2023b).

Para obtener la radiación UV cercana a la realidad se debe considerar la cantidad de nubes y su posición, que generan la disminución de la incidencia de la

radiación UV solar. De la Tabla 1, se estima la radiación incidente sobre la superficie de los diferentes departamentos. Otros fenómenos, como las nieblas y lluvias, afectan también, significativamente a la radiación UV.

Tabla 1

Factor nubosidad y lluvias que afecta al índice UV solar

Cantidad de Nubes				
Nubes	Despejado o con nubes muy dispersas	Brillo Solar con nubosidad	Resplandor	Cielo cubierto
Altas	1	1	1	0.9
Medias	1	1	0.8	0.5
Bajas	1	0.8	0.5	0.2

Otros fenómenos

Nieblas				0.4
Lluvias				0.2

Nota. Tabla obtenida de SENAMHI (2023a).

Con el índice UV obtenida a cielo despejado (Figura 4), se calcula el valor relacionado con la altura de la nube y la descripción del cielo (Tabla 1), y luego se multiplica este valor por el índice UV para obtener la cantidad de atenuación causada por la presencia de nubes. A modo de ejemplo, si está lloviendo y el UVI para un cielo despejado es de 16, el cálculo sería el siguiente: $16 \times 0.2 = 3.2$. A partir de la Tabla 1, se puede inferir que las nubes disminuyen la intensidad de la radiación ultravioleta en ciertos escenarios, aunque no la eliminan por completo.

Medición de radiación UV solar

Un espectrofotómetro UV solar permite medir esta variable; está constituido por un sensor de radiación UV, que detecta la intensidad de la radiación UV del Sol en diferentes λ , acondicionando la señal para su procesamiento mediante un dispositivo microcontrolador (Wiltronics, 2016).

La medición de la radiación UV se produce normalmente por el efecto fotoeléctrico interno que se genera en los fotodiodos. Estos sensores están contruidos mediante uniones P-N sensibles a la luz. La unión P-N funciona con polarización inversa, lo que evita cualquier flujo de corriente significativo a menos que los pares electrón-hueco sean creados por la incidencia de fotones (Boylestad & Nashelsky, 2003). Por tanto, la radiación produce una corriente eléctrica que es de primer orden, linealmente proporcional a la irradiancia incidente. El material utilizado para construir el fotodiodo determina la λ al que es sensible el sensor. Para el rango ultravioleta con λ inferior a 400 nm, se utiliza comúnmente el silicio, ya que es sensible entre 190 y 1100 nm (Zehe & Thomas, 2001). Esta sensibilidad no es igual para todas las λ , por tanto, se debe considerar una función de respuesta espectral específica para cada sensor.

Los principales canales de distribución de dispositivos electrónicos ofrecen una gran cantidad de sensores que podrían implementarse en el diseño. Sin embargo, estos canales de distribución están especializados en sensores de alta gama, por tanto, no son asequibles para todos los usuarios. Uno de los módulos más utilizados es el UVM30A (Figura 5), el gran éxito de este sensor se debe en parte a su fácil control mediante una placa Arduino u otro controlador para medir la radiación UV-A y UV-B (Naylamp-mechatronics, 2018).

Figura 5

Módulo para medición de radiación UV solar UVM30A

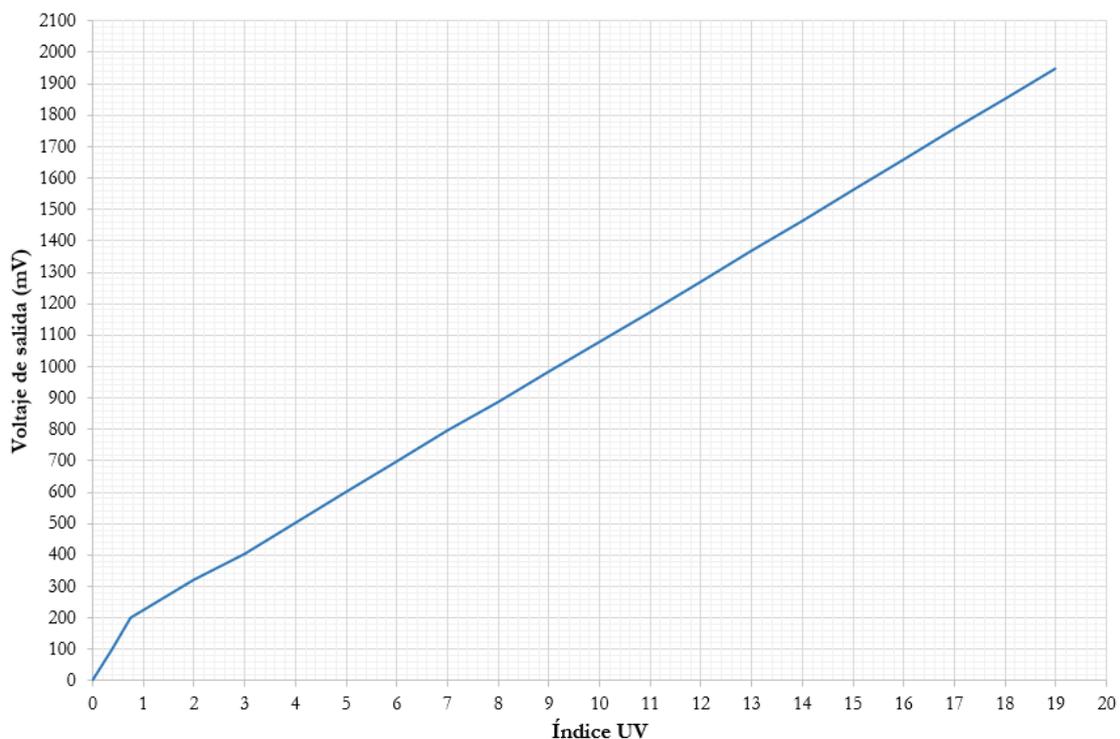


Nota. Obtenido de Naylamp-mechatronics (2018).

Dentro de las características del módulo UVM30A resaltan: rango de operación de 3 a 5 voltios, consumo de corriente de 0.06 a 0.1 miliamperio, rango de detección comprendido entre 200 y 370 nanómetros (nm), temperatura de trabajo .desde -20 grados Celsius hasta 85 grados Celsius, salida analógica aplicable en mediciones para procesos industriales (ver Figura 6), cuidados de la piel meteorología y otros por presentar dimensión compacta de 28 milímetros de largo, 12 milímetros de ancho y 10 milímetros de alto (Naylamp-mechatronics, 2018).

Figura 6

Relación índice UV – voltaje de salida del UVM30A



Nota. Obtenido de características técnicas del sensor UVM30A (Wiltronics, 2016).

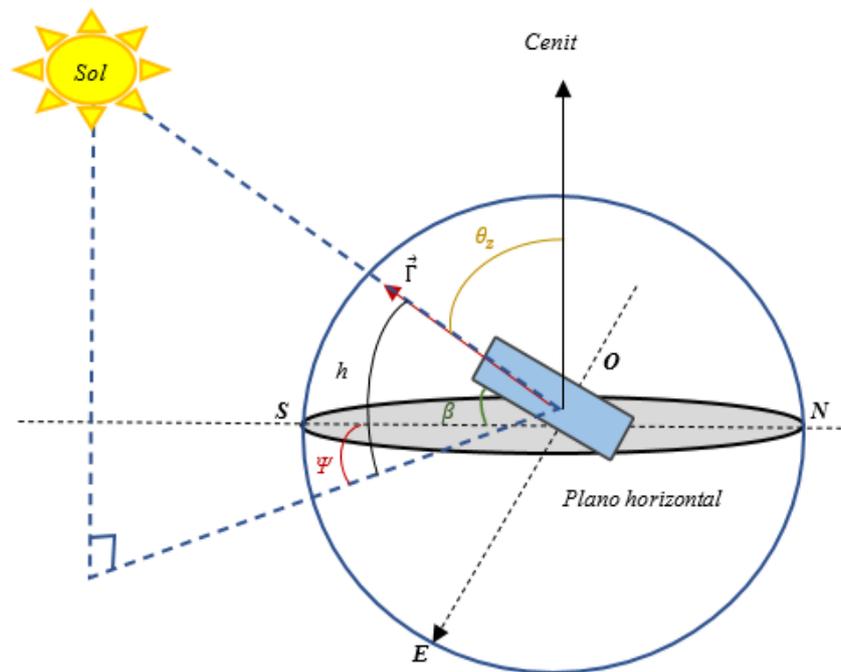
1.1.3 Fotocatalizador solar

Un fotocatalizador solar es un dispositivo absorbente de radiación solar ultravioleta y que introduce al reactor donde se generan reacciones químicas. Puede considerarse colector solar móvil o estático, en este estudio, se utilizó un fotocatalizador estático. Este fotocatalizador está configurado como una placa plana orientada hacia la línea ecuatorial, siendo el ángulo de elevación basado en

la latitud del lugar (-12.40), lo que se multiplica por un factor de corrección de 0.87 (debido a la ubicación en el hemisferio sur); siendo el ángulo de elevación real 11° , como se ilustra en la Figura 7. Esta orientación se recomienda para maximizar la captación de luz solar y, como resultado, se obtiene una mayor intensidad de radiación UV solar (Nfaoui & El-Hami, 2018).

Figura 7

Inclinación del fotorreactor con respecto al Sol



Nota. Ángulo $\beta \approx 11^\circ$, calculado a partir del trabajo de Nfaoui y El-Hami (2018).

Fuente: Citado en Carbajal-Morán (2021).

Irradiancia para procesos fotocatalíticos solares

El proceso fotocatalítico aprovecha la radiación ultravioleta solar para aplicarla en la irradiación fotónica al agua gris, lo que conlleva a la interacción con los elementos orgánicos e inorgánicos.

Los fotones que llegan a una superficie específica se cuantifican en términos de flujo de fotones por área, y se expresa en fotones por m^2 por segundo (fotones/ m^2s). También es posible utilizar la unidad llamada Einstein de fotones, que equivale a un mol de fotones [$6.023 \times (2^{10} - 1)$ fotones/ m^2s]. La luz

monocromática emitida en las radiaciones con una λ y una energía E_λ ; generan una cantidad de N_λ fotones que se relaciona con la energía Q_λ , tal como se describe en la ecuación 20.

$$N_\lambda = \frac{E_\lambda}{Q_\lambda} = \frac{\lambda}{hc} E_\lambda \quad (20)$$

La constante de Planck es representada por el valor $h = 6.626 \times 10^{-34}$ Js, y la velocidad de la luz sin obstáculos $c = 2.998 \times 10^{17}$ nanómetros por segundo.

Cuando se trata de la radiación solar que índice y es policromática, abarca una variedad de λ ; la cantidad de fotones se halla mediante la integración de la ecuación que sigue a continuación (Riordan et al., 1990):

$$N_{UV} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N(\lambda) d\lambda = \frac{1}{hc} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_\lambda d\lambda \quad (21)$$

Cuando la distribución espectral de la radiación UV se mantiene constante, se emplea la ecuación 22 para caracterizar la radiación UV directa y la ecuación 23 para la radiación UV global.

$$E_D(\lambda) = f_D(\lambda) UV_D \quad (22)$$

$$E_G(\lambda) = f_G(\lambda) UV_G \quad (23)$$

La irradiancia solar ultravioleta es representada por UV_D y la irradiancia global es representada por UV_G , los que son medidos por radiómetros ($f_D(\lambda), f_G(\lambda)$). Es importante tener en cuenta que, en diferentes estaciones del año, el espectro de radiación ultravioleta del sol permanece prácticamente invariable para esa estación en particular, lo que nos lleva a aplicar la ecuación 24.

$$\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) = 1 \quad (24)$$

La ecuación 25 permite calcular el flujo fotónico considerando la sumatoria de las λ (λ_1 y λ_2).

$$N = \frac{1}{hc} \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda)\lambda \quad (25)$$

El flujo de fotones directo (N_D) y flujo global (N_G) de la irradiancia solar se calcula con la ecuación 26 y ecuación 27 respectivamente.

$$N_D = \frac{UV_D}{hc} \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda f_D(\lambda) \quad (26)$$

$$N_G = \frac{UV_G}{hc} \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda)\lambda \quad (27)$$

Las longitudes de onda λ_1 y λ_2 abarcan el rango de λ en el cual se encuentra la radiación solar UV directa y la radiación UV global (Curcó et al., 1996). La cantidad de fotones por metro cuadrado por segundo se representa como N. Para calcular el flujo de fotones, se utiliza la fórmula $\frac{N}{6.023 \times 10^{23}}$; donde 6.023×10^{23} corresponde al número de Avogadro (NA). La unidad de esta división se expresa en términos de Einstein por metro cuadrado por segundo.

Los flujos fotónicos son la medida de la cantidad de fotones que incide en un reactor, dando lugar a reacciones influenciadas por la geometría del reactor. La radiación volumétrica del reactor se mide en unidades de Einstein por segundo por litro (Einstein/Ls).

La eficiencia fotónica ξ_λ , según lo señalado por Serpone y Emeline (2002, p. 124), se define en la ecuación 28 como una función de la velocidad de la reacción (r) y la radiación absorbida en el reactor [$N(\lambda)$]. En un proceso fotocatalítico solar, la velocidad de las reacciones indica la cantidad de moles del soluto descomponiendo o mineralizando los elementos dentro de un proceso.

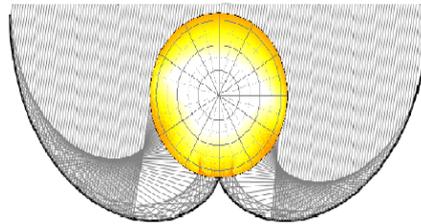
$$\xi_\lambda = \frac{r}{N(\lambda)} \quad (28)$$

Fotocatalizador con colector cilíndrico parabólico compuesto

El fotocatalizador utilizado en el estudio empleó un tubo reflejado por cilíndricos parabólicos compuestos (CPC), que se considera rentable y eficaz al aplicarse en procesos fotoquímicos (Otálvaro et al., 2017). El CPC cuenta con superficies de alta reflectancia capaz de crear una envoltura radiante que circunda al reactor, como se muestra en la Figura 8. Este tipo de reactor presenta un factor de concentración (FC) que se aproxima a 1 al ser posicionado en forma ortogonal a los rayos del Sol.

Figura 8

Radiación solar reflejada en reactores cilíndricos parabólicos compuestos



Nota. Adaptado de Otálvaro et al. (2017). **Fuente:** Citado en Carbajal-Morán (2021).

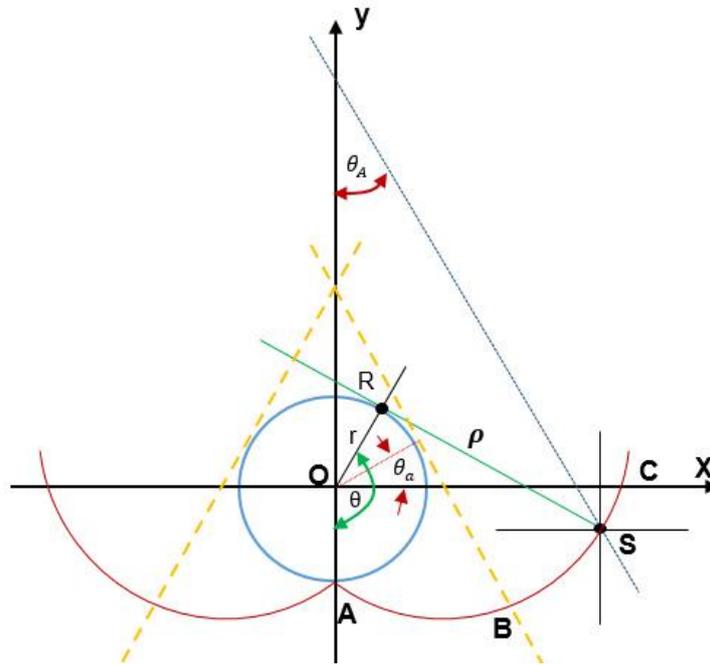
El modelo matemático del reactor con tubo que se muestra en la Figura 9, es posible llevar a cabo considerando un punto de referencia S y utilizando los el ángulo θ y distancia ρ , que definen la tangente al reactor que tiene forma de tubo (Kreider, 1979).

$$\theta = \overline{OA} \sphericalangle \overline{OR} \quad (29)$$

$$\rho = \overline{RS} \quad (30)$$

Figura 9

Curvatura y ángulos de radiación en un colector cilíndrico parabólico compuesto



Nota. La aceptación se define como $2\theta_a$, Kreider (1979). **Fuente:** Citado en Carbajal-Morán (2021).

En la Figura 9, se identifican dos secciones que posibilitan la formulación matemática de cómo incide la radiación sobre el cilindro. Estas secciones son la que abarca desde A hasta B y la que se extiende desde B hasta C, considerándose las ecuaciones 31 y 32, respectivamente.

Para la sección AB se tiene;

$$\rho = r\theta; |\theta| \leq \theta_a + \pi/2 \quad (31)$$

Para la sección BC se tiene;

$$\rho = r \frac{\theta + \theta_a + \pi - \cos(\theta - \theta_a)}{1 + \text{sen}(\theta - \theta_a)}; \theta_a + \pi/2 \leq |\theta| \leq \frac{3\pi}{2} - \theta_a \quad (32)$$

El inverso del seno del ángulo θ_a (de la ecuación 33) se denomina el factor que posibilita la concentración del colector CPC (C_{CPC}).

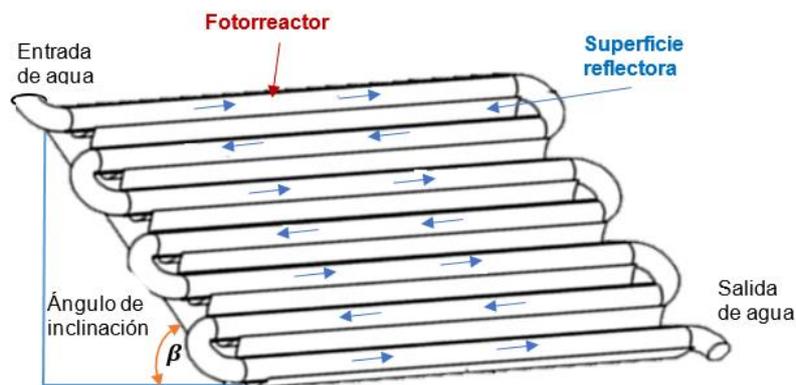
$$C_{CPC} = \frac{1}{\text{sen}\theta_a} \quad (33)$$

El valor de C_{CPC} abarca un rango de 1 a 1.15, ya que depende de la variación del ángulo de aceptación (θ_a), que va desde 60° hasta 90° . En la Figura 10, el colector CPC utiliza un material reflector compuesto de aluminio y zinc, además de tubos de vidrio altamente transparente. En estos colectores, el agua fluye con facilidad cuando es impulsada para recircular a través de los tubos, lo que es una ventaja en comparación con los dispositivos planos donde esta característica no está presente (Vidal et al., 1999).

El C_{CPC} varía en un rango de 1 a 1.15, ya que el ángulo de aceptación (θ_a) se encuentra en un intervalo de 60° a 90° . En la Figura 10, el colector CPC utiliza un material reflector compuesto de aluminio y zinc, junto con tubos fotorreactores de vidrio altamente transparentes, siendo los componentes clave para lograr la fotocatálisis.

Figura 10

Diagrama de colector cilíndrico parabólico compuesto, aplicado a un proceso de fotocatálisis



Nota. Valor del ángulo de inclinación $\beta \approx 11^\circ$ orientado al norte. **Fuente:** Tomado de Carbajal-Morán (2021).

Dióxido de titanio como fotocatalizador

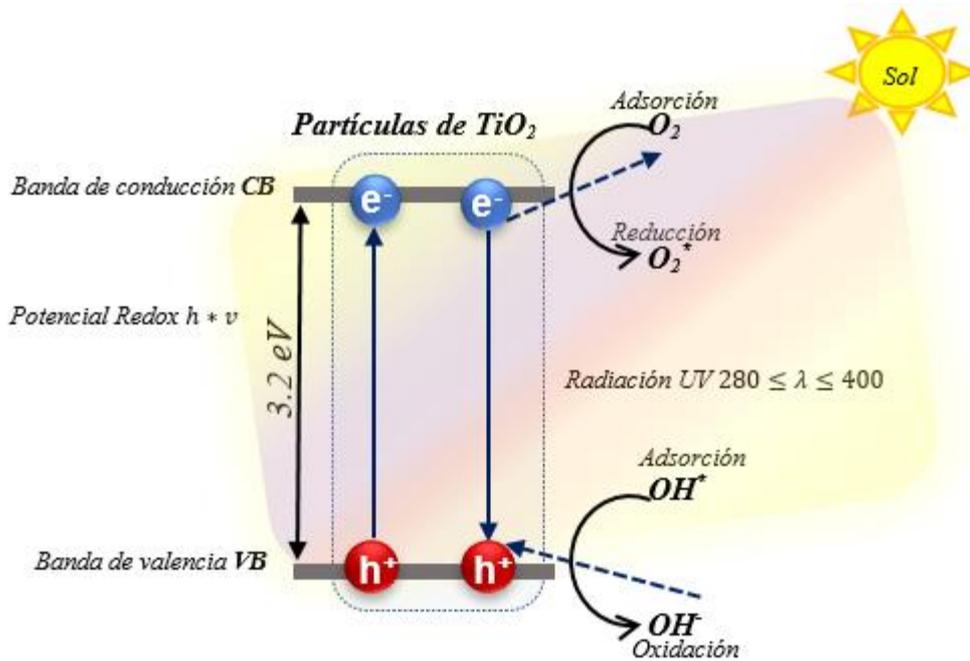
El dióxido de titanio (TiO_2) es un material ampliamente utilizado como fotocatalizador en muchas aplicaciones. En procesos de fotocatálisis, el TiO_2 es expuesto a la radiación ultravioleta o luz solar, lo que provoca la generación de par electrón-hueco altamente reactivos y pueden desencadenar reacciones químicas en presencia de sustancias contaminantes o compuestos orgánicos, contribuyendo a su degradación o mineralización (Colina & Castilla, 2013).

Este proceso fotocatalítico que involucra al dióxido de titanio se utilizan en aplicaciones para purificar agua, eliminación de contaminantes en el aire, y en la descomposición de contaminantes orgánicos persistentes. El dióxido de titanio es apreciado por su eficacia y seguridad, ya que no se agota durante las reacciones y no deja residuos tóxicos, lo que lo convierte en un fotocatalizador de elección en numerosas aplicaciones medioambientales y tecnológicas. En procesos fotocatalíticos, se valora especialmente aquellos que tienen alto rendimiento cuántico, en particular el fotocatalizador del tipo Degussa P25; este fotocatalizador se destaca por altamente degradante (Hashimoto et al., 2005).

Cuando una partícula de TiO_2 es expuesta a la luz solar, desencadena un proceso de fotocatálisis debido a la radiación UV con un rango de λ de 280 a 400 nm, lo que equivale a una energía de 3.2 electronvoltios ($E=3.2 \text{ eV}$). Este proceso permite que los electrones se muevan desde la banda de valencia a la banda de conducción, lo que a su vez genera radicales OH^* en agua contaminada.

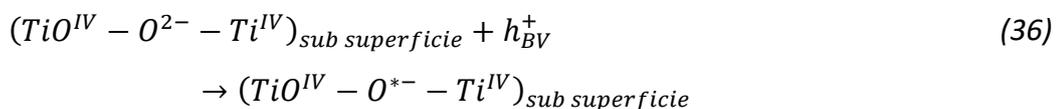
Figura 11

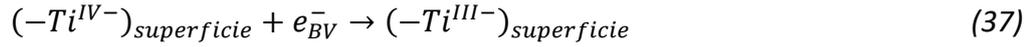
Acción de TiO_2 en el agua en agua bajo la influencia de radiación UV solar



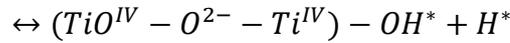
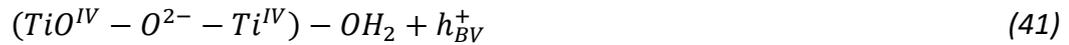
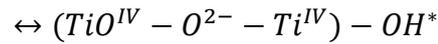
Nota. La partícula del TiO_2 en presencia de H_2O genera un par electrón-hueco (e^-/h^+) (Otálvaro et al., 2017). **Fuente:** Citado en Carbajal-Morán (2021).

La fotocatalisis con TiO_2 se produce siguiendo las ecuaciones 34 - 41, tal como se ha documentado en investigaciones anteriores (Colina & Castilla, 2013; Herrmann et al., 1999; Serpone & Emeline, 2002). En la ecuación 34, se genera un par electrón-hueco localizados en las bandas de conducción y valencia. El hueco se desplaza hacia la superficie, donde es capturado por la energía superficial ($TiO^{IV} - O_2 - Ti^{IV}$), las trampas superficiales atrapan al “ e^- ” (Jiang et al., 2003); según lo indicado en las ecuaciones 35 y 36; o bien por trampas exteriores por medio de donantes de electrones ($Red_{2,ads}$) y los receptores de electrones ($OX_{1,ads}$), como se especifica en las ecuaciones 37 y 38 (Fernández, 2003).





Para mantener el par $\frac{e^-}{h^+}$ es necesario que Red₂ y Ox₁ se encuentren presentes y sean absorbidos. El agua desempeña un papel como donante/aceptor de electrones, de manera que con TiO₂ en agua, los huecos en las "trampas" generadas por el TiO₂, como se muestra en la ecuación 39, generan radicales OH* que se unen a la superficie, según se describe en las ecuaciones 40 y 41. Cuando se genera el electrón, con el O₂, da lugar al radical superóxido O₂*⁻ (como se indica en la reacción j), lo que previene la recombinación del par electrón/hueco (Fernández, 2003).



El H₂O es reductor cuando está presente el O₂, transformándose las reacciones (ecuaciones 40 y 41) en sus correspondientes ecuaciones 42 y 43.



1.2. Aguas grises para agricultura

El agua es elemental para la vida y el desarrollo sostenible. Las aguas grises son parte de las aguas residuales que se originan en tareas domésticas, como lavar platos, ducharse y lavar ropa (Albalawneh et al., 2017; Bahrami et al., 2020; Prajapati et al., 2019). A diferencia de las aguas negras, que contienen materia fecal, las aguas grises son menos contaminantes y, por lo que, pueden ser tratadas y reutilizadas (Singh et al., 2020). Se estima que la generación de aguas grises puede constituir de 60% hasta un 75% del total del volumen de aguas residuales

generadas por las viviendas (Khanam & Patidar, 2022; Leal et al., 2011).

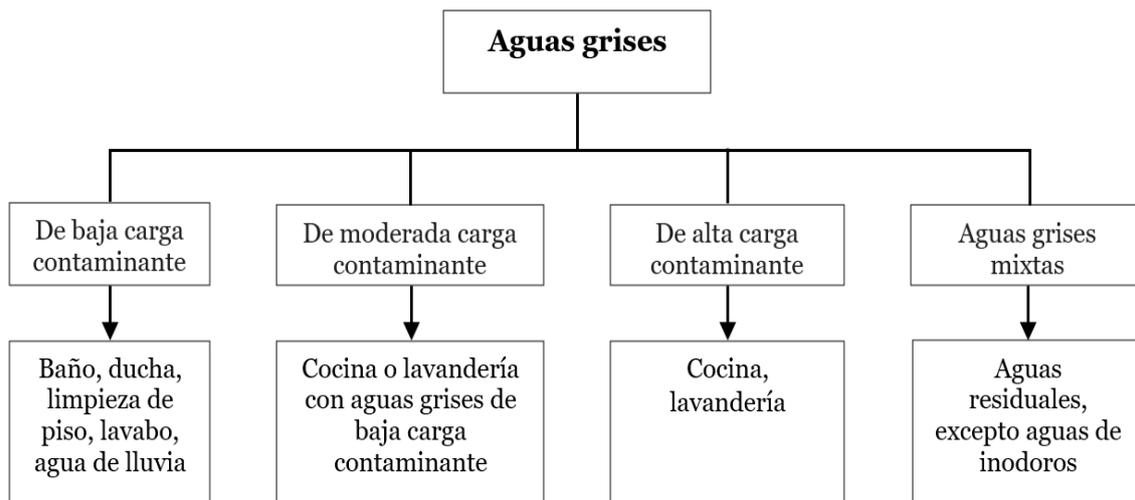
Clasificación de aguas grises

Según el grado de contaminación, las aguas grises se clasifican como aguas grises de alta carga contaminante o aguas grises de baja carga contaminante (Boyjoo et al., 2013). Las aguas grises de alta carga contaminante tienen un poder contaminante significativo el cual incluye aguas grises de cocina y lavandería, mientras que las aguas grises de baja carga contaminante tienen comparativamente menos poder contaminante debido a la exclusión de aguas grises provenientes de cocina (Gross et al., 2007; Nolde, 2000). Para uso en la agricultura no es recomendable el uso de aguas grises de cocina debido a su alto poder contaminante (Christova-Boal et al., 1996).

Las aguas grises se clasifican en función del grado de contaminante proveniente de diversas fuentes de aguas grises. Según la carga contaminante, las aguas grises se pueden clasificar como aguas grises de carga contaminante baja, aguas grises de carga contaminante moderada, aguas grises de carga contaminante alta y aguas grises mixtas (Figura 12).

Figura 12

Clasificación de aguas grises



Nota. Figura adaptada del trabajo de Khanam y Patidar (2022).

1.2.1 Aguas grises con carga contaminante

Aguas grises de baja carga contaminante

Estas aguas excluyen las aguas provenientes de cocina. Estas aguas grises son producidas a partir del agua de lluvia, la ducha, la limpieza de pisos y el lavabo, y no incluyen las aguas grises de la cocina ni de la lavandería (Kim et al., 2007; Santos et al., 2012). Estas aguas grises son menos biodegradables porque la fuente es generalmente no biodegradable ya que está compuesto en su mayoría por jabón, champú, cabello, etc. (Samayamanthula et al., 2019).

Aguas grises de carga contaminante moderada

Las aguas grises con carga contaminante moderada son una combinación de aguas grises con carga contaminante alta y ligera (Bahrami et al., 2020). La fuerza de la contaminación se encuentra entre aguas grises con baja y alta carga contaminante debido a la combinación de aguas grises de alta y baja resistencia; las aguas generadas en lavandería o cocina con aguas grises de baja concentración, es decir, duchas, lavabos, limpieza de pisos, etc., son aguas grises de carga contaminante moderada (Otterpohl et al., 1997).

Aguas grises de alta carga contaminante

Estas aguas están altamente cargados de contaminantes y contienen aguas grises de cocinas y lavanderías (Šostar-Turk et al., 2005). Mientras las aguas grises de lavandería de cocina se consideran como aguas grises de alta carga contaminante, los parámetros químicos son altos tanto en las aguas grises de la ropa como en las de la cocina. Las aguas grises de lavandería se componen principalmente de detergente y las aguas grises de cocina tienen una alta concentración de contaminantes y aceites que provocan una alta biodegradabilidad. Las aguas grises con alta carga contaminante poseen un alto poder contaminante, pero menor que las aguas grises mixtas; estas aguas también se utilizan en diversos estudios y pueden generarse en actividades domésticas (lavavajillas, fregadero, lavadora) o públicos (lavandería de autoservicio, cocina, restaurante, etc.).

Aguas grises mixtas

Las aguas grises mixtas excluyen los residuos sanitarios, incluyen aguas grises con carga contaminante moderada, mezclado con aguas grises de baja contaminación, aguas grises de carga contaminante moderada y aguas grises de carga contaminante alta, tiene un alto poder contaminante que otros tipos de aguas grises (Eriksson et al., 2009). Las aguas grises mixtas tienen los parámetros físicos, químicos y microbiológicos más altos.

1.2.2 Características de aguas grises

La característica de las aguas grises depende de sus características físicas, químicas y microbiológicas, las características pueden ser cuantitativas y cualitativas según el tipo de aguas grises en países desarrollados y en vías de desarrollo (Khanam & Patidar, 2022).

Características cuantitativas

Las aguas grises comprenden aguas residuales domésticas y públicas, excluidas las aguas residuales de inodoros (Imhof & Mühlemann, 2005). Las fuentes de generación de aguas grises son bañeras, duchas, fregadores de suelos, lavanderías, lavabos, lavavajillas y fregaderos de cocina. Consiste en una gran parte de aguas residuales domésticas, aproximadamente entre el 60% y el 70%. La cantidad de producción de aguas grises varía según la ubicación, las costumbres, la infraestructura, las instalaciones utilizadas, el nivel de vida y los hábitos. Estos factores están directamente relacionados con el nivel de desarrollo y, por lo tanto, la cantidad de aguas grises se puede caracterizar en función del nivel de desarrollo. El cuadro 2 ilustra las características cuantitativas según el nivel de desarrollo. Se observa que la cantidad típica de generación de aguas grises en los países desarrollados varía de 58 a 238 litros por día (Lpd).

La cantidad de aguas grises utilizadas en las actividades domésticas depende de los estilos de vida, las estructuras de población, los niveles de vida, las costumbres, los hábitos, el grado de abundancia de agua y las instalaciones de agua (Morel & Diener, 2006); mientras que en los países en desarrollo se sitúa

entre 24 y 177 Lpd. El volumen de aguas grises en los países de bajos ingresos es debido a la escasez de agua y a formas simples de suministro de agua (Morel & Diener, 2006). En la Tabla 2, se aprecia que aguas grises de la lavandería en países en desarrollo son mucho menores que en países desarrollados debido a que la ropa se lava a mano y no se usa en su totalidad la lavadora.

Tabla 2

Características cuantitativas de las aguas grises

Fuente	Países desarrollados (Lpd)	Países en desarrollo (Lpd)
Ducha, bañera y lavabo	33-90	15-83
Lavandería	13-85	5-30
Cocina/lavavajillas	12-63	4-64
Total de aguas grises	58-238	24-177

Nota. Adaptado de Khanam y Patidar (2022).

Características cualitativas

Las cualidades de las aguas grises, varían mucho en términos de parámetros físicos, químicos y bacteriológicos para las diferentes aguas grises; la calidad de las aguas grises es consecuencia dependiente del estilo de vida de las personas, de los productos empleados en actividades cotidianas y de la naturaleza de la instalación y, por tanto, sus características son muy variables (Eriksson et al., 2009).

— Parámetro físico

Las características de los parámetros físicos dependen principalmente de la fuente de las aguas residuales. El aceite, los alimentos, las partículas de tierra de las aguas provenientes de la cocina, el cabello, las fibras, el detergente usado en el lavado de la ropa, el jabón, el champú de la ducha, el baño y el jabón del lavabo son los principales componentes de la turbidez y los sólidos en todo tipo de aguas grises; puede provocar obstrucción de tuberías y del sistema de tratamiento debido a la presencia de coloides y partículas no biodegradables (Boyjoo et al., 2013).

— **Parámetro químico**

Las aguas grises con un valor de pH que oscila entre 5 y 10 son de naturaleza alcalina y las aguas negras que tienen un pH entre 6 y 7.7 son de naturaleza ácida (Khanam & Patidar, 2022). Como las aguas grises de la cocina contienen los niveles más altos de contaminación orgánica en forma de proteínas, carbohidratos (principalmente de desechos de alimentos), grasas y aceites, tienen altos niveles de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO) y nutrientes; la principal causa de una mayor intensidad de la contaminación en los países en desarrollo es el alto valor de DQO y DBO en todo tipo de aguas grises en comparación con los países desarrollados (Khanam & Patidar, 2022, p. 7).

— **Parámetro microbiológico**

Las aguas grises están libres de desechos sanitarios pero contienen organismos patógenos (Khanam & Patidar, 2022). La principal fuente de contaminación microbiológica es el lavado de manos luego de ir al baño, lavar los pañales, bañar a los bebés después de defecar, limpiar los desechos de los animales de compañía, etc. Las características de las aguas grises para las diferentes categorías es que se encuentran contaminadas por microorganismos; también, observan coliformes totales, coliformes fecales y E-coli 10^{-10^7} ufc/100 ml, $0.1-10^8$ ufc/100 ml, 10^{-10^3} ufc/100 ml en los países desarrollados y $10^2 -10^8$ ufc/100 ml , $10^2 -10^5$ ufc/100 ml, $1-10^6$ ufc/100 ml en países en desarrollo (Khanam & Patidar, 2022).

1.2.3 Generación de aguas grises en el Perú

La generación de aguas grises en el Perú es proporcional a la producción de aguas residuales domésticas siendo variada y dependiente de la densidad poblacional de cada departamento (ver Tabla 3), estando siempre en incremento la producción de las aguas residuales domésticas en todos los departamentos del Perú con mayor énfasis en Lima. En el año 2021 de manera excepcional disminuyó la descarga de aguas residuales domésticas, debido a diversos

factores ambientales y de salud. El desarrollo económico y las prácticas de gestión del agua, la instalación de sistemas de reutilización de aguas grises en edificios y viviendas puede aumentar significativamente la cantidad de agua a reutilizar (INEI, 2022).

Tabla 3

Descarga anual de aguas residuales domésticas sin tratamiento, en departamentos del Perú, 2017-2021

Departamento	2017 M ³	2018 M ³	2019 M ³	2020 M ³	2021 M ³
Total	234 418 233	243 087 012	267 519 412	270 049 280	255 164 326
Amazonas	4 153 054	4 332 274	4 650 460	4 768 068	4 963 756
Áncash	15 173 521	16 390 841	16 654 123	16 176 868	16 060 359
Apurímac	4 235 956	4 449 259	4 625 252	4 583 912	4 631 185
Arequipa	3 126 464	3 335 065	3 272 505	3 492 426	3 627 303
Ayacucho	202 053	-	10 606	43 415	136 116
Cajamarca	7 504 667	7 714 778	8 261 136	8 103 861	7 917 394
Cusco	9 767 191	7 342 430	9 005 343	8 959 149	7 340 656
Huancavelica	2 267 556	2 252 490	2 341 298	2 306 545	2 302 361
Huánuco	10 293 541	10 724 665	11 859 623	11 280 068	11 753 126
Ica	5 694 794	6 238 131	8 430 922	8 268 130	8 007 624
Junín	29 533 345	29 428 215	29 416 952	29 411 490	30 608 861
La Libertad	12 323 885	11 836 937	12 258 801	13 130 816	13 786 336
Lambayeque	263 962	461 193	372 204	333 571	423 132
Lima	69 834 095	75 927 981	88 484 252	90 207 673	76 690 670
Loreto	10 562 500	10 390 062	12 687 928	13 113 606	13 157 585
Madre de Dios	1 757 965	1 974 087	2 099 715	2 052 867	1 886 666
Moquegua	150 128	396 082	288 799	630 414	1 062 287
Pasco	1 263 531	1 219 562	1 392 663	1 215 919	1 229 383
Piura	10 561 269	12 261 887	15 016 165	15 376 651	12 492 596
Puno	6 297 863	6 540 805	6 971 550	6 787 373	7 293 722
San Martín	10 252 174	10 532 988	10 669 562	11 112 267	11 243 244
Tacna	4 878 084	5 482 920	5 091 173	5 059 181	5 146 127
Tumbes	3 923 571	3 686 002	3 646 967	4 563 313	4 767 516
Ucayali	10 397 064	10 168 358	10 011 411	9 071 698	8 636 319

Nota. Datos obtenidos de Perú: Anuario de Estadísticas Ambientales 2022 (INEI, 2022, p. 387).

1.2.4 Aguas grises para agricultura

Estándar de calidad (ECA - Agua) para recuperación de aguas grises para agricultura

El riego agrícola es una de las principales aplicaciones que demanda de agua en reutilización (Murcia et al., 2014). Para garantizar la seguridad de los cultivos y la protección del medio ambiente, se establecen Estándares de Calidad del Agua (ECA) para uso en riego. Estos estándares especifican los niveles máximos permisibles de contaminantes en el agua utilizada para riego, con enfoque en parámetros como la concentración de sólidos suspendidos, nutrientes, metales pesados, entre otros. De acuerdo al ECA-Agua (MINAM, 2017a) para el riego de vegetales no restringido; la conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (OD), potencial de hidrógeno (pH), potencial de óxido-reducción (ORP), turbiedad, cloro libre residual (FCL) y la temperatura deben mantenerse en los márgenes y rangos que se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4

Valores y rangos de los parámetros del agua para riego no restringido en agricultura

Parámetros	Unidad	Rango
CE	μS/cm	≤2500
OD	mg/L	≥ 4
pH	Unidad	6.5 – 8.5
ORP	mV	≥ 500*
Turbiedad	UNT	≤ 35**
FCL	mg/L	< 1**
Temperatura	°C	Δ3

Nota. Valor de parámetros del agua adaptados del ECA – agua, categoría 3-D1 (MINAM, 2017b, p. 17). * Tomado de trabajos experimentales (Victorin et al., 1972).** Adaptado de (Akiça, 2004; FAO, 1999).

Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

La gestión de aguas grises está sujeta a regulaciones nacionales en muchos países. Estas regulaciones abordan cuestiones como la recolección, tratamiento y reutilización de aguas grises. Algunos países, como Australia, China (Javadinejad et al., 2020) y Estados Unidos (Yu et al., 2013), han desarrollado pautas específicas para el uso de aguas grises en aplicaciones no potables, como el riego en agricultura. A nivel internacional, existen acuerdos y directrices que abordan la gestión sostenible del agua. La Agenda 2030 de la ONU, incluyen los Objetivos de Desarrollo Sostenible e insta a garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento (ODS 6), lo que incluye la gestión eficiente de aguas grises.

Los ODS están constituido por 17 objetivos establecidos por las Naciones Unidas con el objeto de abordar los desafíos globales. El ODS 6 se centra en agua limpia y saneamiento, y uno de sus subobjetivos (ODS 6.3) que establece “De aquí a 2030, mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial” (CEPAL, 2015). El cual se relaciona directamente con las aguas grises al instar a reducir la contaminación del agua y aumentar la reutilización segura del agua.

Las aguas grises desempeñan un papel importante en la consecución de los ODS, al contribuir a la conservación del agua dulce y la reducción de la contaminación del agua. La reutilización segura de aguas grises en aplicaciones no potables puede ayudar a alcanzar los objetivos de agua limpia y saneamiento (ODS 6) y promover prácticas sostenibles de gestión del agua.

Las aguas grises son un recurso valioso para abordar la escasez de agua y promover el desarrollo sostenible. Los datos estadísticos porcentuales por países revelan disparidades en la generación de aguas grises a nivel mundial. La gestión eficiente de las aguas grises, la adopción de ECAs para agricultura, el

cumplimiento de regulaciones nacionales e internacionales y el alineamiento con los ODS son esenciales para maximizar los beneficios de las aguas grises en la conservación del agua y la promoción de prácticas sostenibles de gestión del agua a nivel global.

CAPÍTULO II

CONTROL DE PROCESOS CON PLC S7-1500

2.1. Control de Procesos

2.1.1 Procesos

Los procesos son parte fundamental para las transformaciones a nivel de innovación tecnológica, industrial, educativo, e inclusive de la vida cotidiana; ya que permiten llevar a cabo tareas y alcanzar objetivos de manera ordenada y eficiente. Drucker (2020), considerado el padre de la gestión moderna, definió un proceso como un grupo de acciones que reciben información inicial, la enriquecen y entregan un resultado final al cliente. Drucker hizo hincapié en la importancia de la eficiencia y la mejora de los procesos en la gestión empresarial.

Por otro lado, Hammer y Champy (1993) autores de "Reingeniería de Procesos" describen un proceso como un conjunto de tareas que recibe información inicial, la enriquece y entrega un resultado dirigido a un cliente en particular, su enfoque se centra en la reestructuración radical de los procesos para obtener mejoras significativas en eficiencia y efectividad. Así mismo, Ishikawa (2003), un experto en control de calidad, define un proceso como un grupo de procedimientos, acciones, labores y responsabilidades interconectadas empleadas en la creación de un producto o prestación de un servicio, se concentra en la mejora de la calidad y la reducción de defectos en los procesos de fabricación.

2.1.2 Tipos de procesos

Existen una gran variedad de procesos, cada uno diseñado para cumplir con un propósito específico. Algunos procesos son;

— **Procesos industriales**

En la manufactura y producción, los procesos industriales son esenciales. Estos pueden incluir la fabricación de productos, la refinación de materias primas, el ensamblaje de componentes y la automatización de líneas de producción. Estos procesos a menudo buscan aumentar la eficiencia y la calidad del producto final (Bollaín Sánchez, 2019).

— **Procesos fotocatalíticos**

Los procesos fotocatalíticos son fenómenos químicos que involucran la utilización de la luz, en particular la luz UV, para acelerar y facilitar reacciones químicas en una amplia variedad de aplicaciones. Este proceso se basa en la capacidad de ciertos materiales, conocidos como fotocatalizadores (Miranda, 2015), para absorber la luz y, en consecuencia, promover reacciones químicas que de otro modo serían más lentas o incluso imposibles de lograr (Muñoz Flores, 2022).

— **Procesos de fabricación**

En la industria manufacturera, los procesos de fabricación incluyen la formación, corte, soldadura, fundición y mecanizado de materiales para crear productos como piezas de automóviles, dispositivos electrónicos (Boylestad & Nashelsky, 2003) y maquinaria. En el ámbito de la tecnología de la información, los procesos de desarrollo de software, en diferentes plataformas de desarrollo se utilizan para diseñar, desarrollar y mantener aplicaciones informáticas. Estos procesos están diseñados para maximizar la eficiencia y la colaboración en equipos de desarrollo (Moyares & Lorenzo, 2021).

2.1.3 Control de procesos

Los procesos son fundamentales en una amplia gama de disciplinas y sectores. Cada tipo de proceso está diseñado para lograr un conjunto específico de objetivos y puede variar en su complejidad y estructura. Hägglund y Bauer (2023) mencionan que la gestión de procesos es un campo que se enfoca en establecer principios y tácticas para ajustar las variables de un sistema en movimiento hacia un valor específico, incluso cuando hay interferencias o imprecisiones presentes.

La comprensión y la optimización de estos procesos son cruciales para mejorar la eficiencia y la calidad en diversas áreas de la vida y la industria. A nivel tecnológico e industrial requieren ser controlados con dispositivos electrónicos de alta precisión y confiabilidad como son los PLC.

2.2. PLC S7-1500 y control de procesos

Los PLC de la serie S7-1500 de Siemens son dispositivos avanzados ampliamente utilizados en el control y automatización de procesos industriales (Siemens, 2019b). Estos PLC son conocidos por su robustez, confiabilidad y capacidades de alto rendimiento, lo que hace ideal para muchas aplicaciones en el control de procesos sea en lazo abierto o cerrado (Centeno Pomareta, 2017; Rata et al., 2021; Soe & San, 2019).

El PLC S7 1500 es conocido por su capacidad para manejar tanto señales digitales como analógicas empleando módulos conectados a la CPU (ver Figura 13). Las entradas y salidas digitales permiten el procesamiento de señales binarias, lo que es esencial en la mayoría de las aplicaciones industriales donde la lógica de encendido y apagado es fundamental. Por otro lado, las entradas y salidas analógicas son esenciales cuando se necesita un control más preciso y continuo, como en sistemas de regulación de temperatura, velocidad, presión, entre otros, como el control de procesos fotocatalíticos.

Figura 13

CPU y módulos del PLC S7 1500



Nota. Izquierda: Unidad de procesamiento central del PLC SIMATIC S7 1500, centro: módulo de E/S discretos, y derecha: módulo de señales analógica.

Fuente: Tomado de Carbajal-Morán (2021).

El PLC S7 1500 ofrece un conjunto de funciones básicas de control que son esenciales para una variedad de aplicaciones industriales (Rata et al., 2021). Puede manejar temporizadores, contadores, operaciones aritméticas y lógicas, lo que permite controlar procesos complejos con facilidad.

Además, su capacidad de comunicación con diferentes protocolos permite la interconexión con otros dispositivos y sistemas, lo que facilita la integración en líneas de producción y control de procesos en forma automática.

En cuanto a las aplicaciones, el PLC S7 1500 se emplea en una gran variedad de industrias, como: la manufactura, energía y la automatización de edificios inteligentes (Peciña, 2018). A continuación, se da una visión general de cómo los PLC S7-1500 se utilizan en el control de procesos:

— **Automatización de procesos industriales:**

Los PLC S7-1500 son comunes en la automatización de procesos industriales, como la manufactura, la producción y la gestión de plantas incluyendo sistemas de supervisión (Mømmədli & Kabaoğlu, 2021). Pueden controlar y supervisar una amplia gama de equipos como: motores, válvulas, sensores y sistemas de transporte, para garantizar un funcionamiento eficiente y seguro. Al integrarse con otros sistemas como de control de supervisión y adquisición de datos (SCADA) y sistemas de gestión de procesos (MES); permiten un control más amplio y una supervisión en tiempo real de todo el proceso (Corona Ledesma, 2022).

— **Control de secuencias:**

Los PLC S7-1500 permiten programar y controlar secuencias de operación específicas en un proceso. Esto significa que pueden gestionar de manera efectiva el encendido y apagado de equipos, cambios en la velocidad de una línea de producción y la implementación de secuencias de seguridad usando lenguajes de programación estructurada específicos (Guerrero Saiz, 2019).

— **Monitoreo y control de variables:**

Estos PLC pueden monitorear y controlar constantemente variables clave, como el nivel de líquidos, el flujo de materiales y la calidad del producto (Corona Ledesma, 2022). En caso de que alguna variable se desvíe de los valores deseados, el PLC puede tomar medidas correctivas de inmediato de acuerdo al algoritmo de control implementado para este fin.

2.2.1 Características y capacidades del PLC S7-1500

Las características y capacidades del PLC S7-1500 de Siemens son fundamentales para comprender su idoneidad en aplicaciones de control de procesos y en la automatización. Se presentan las características y capacidades de este PLC:

Potencia de procesamiento

El PLC S7-1500 es robusto y ofrece un alto rendimiento referidos a la velocidad de procesamiento y capacidad de cálculo; esto permite la gestión eficiente de procesos complejos y de alta velocidad en tiempo real; los procesadores de alto rendimiento son capaces de manejar una gran cantidad de datos y ejecutar tareas de control de manera rápida y precisa (Siemens, 2019b).

Amplia gama de E/S

Este PLC es versátil en términos de entradas y salidas, lo que significa que puede interactuar con una amplia variedad de sensores y actuadores (Siemens, 2019b). Esto es crucial para adaptarse a las necesidades específicas de diferentes aplicaciones, ya que algunas pueden requerir una cantidad significativa de entradas salidas (E/S) discretas o analógicas para controlar múltiples variables y dispositivos. Las (E/S) del PLC S7 1500 están constituidos por módulos:

a) Módulo de entradas/salidas discretas

El módulo DI 16/DQ 16 x 24 V DC/5.0A (ver Figura 14), es un módulo de 16 entradas/salidas discretas (Siemens, 2016); presenta las siguientes características:

Entradas discretas:

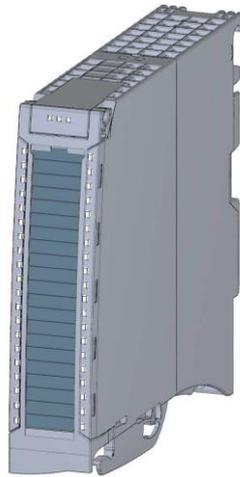
- 16 entradas discretas, agrupados.
- Voltaje de operación 24 V DC.

Salidas discretas:

- 16 salidas discretas, agrupados en 02 bloques de 8.
- Voltaje de operación 24 V DC.
- Corriente de salida para cada canal 0.5 amperios.
- Soporta como carga electroválvulas, relés, contactores DC y lámparas señalizadoras.

Figura 14

Módulo de señales discretas para PLC S7 1500 DI 16x24 VDC/DQ 16x24 VDC/0.5A



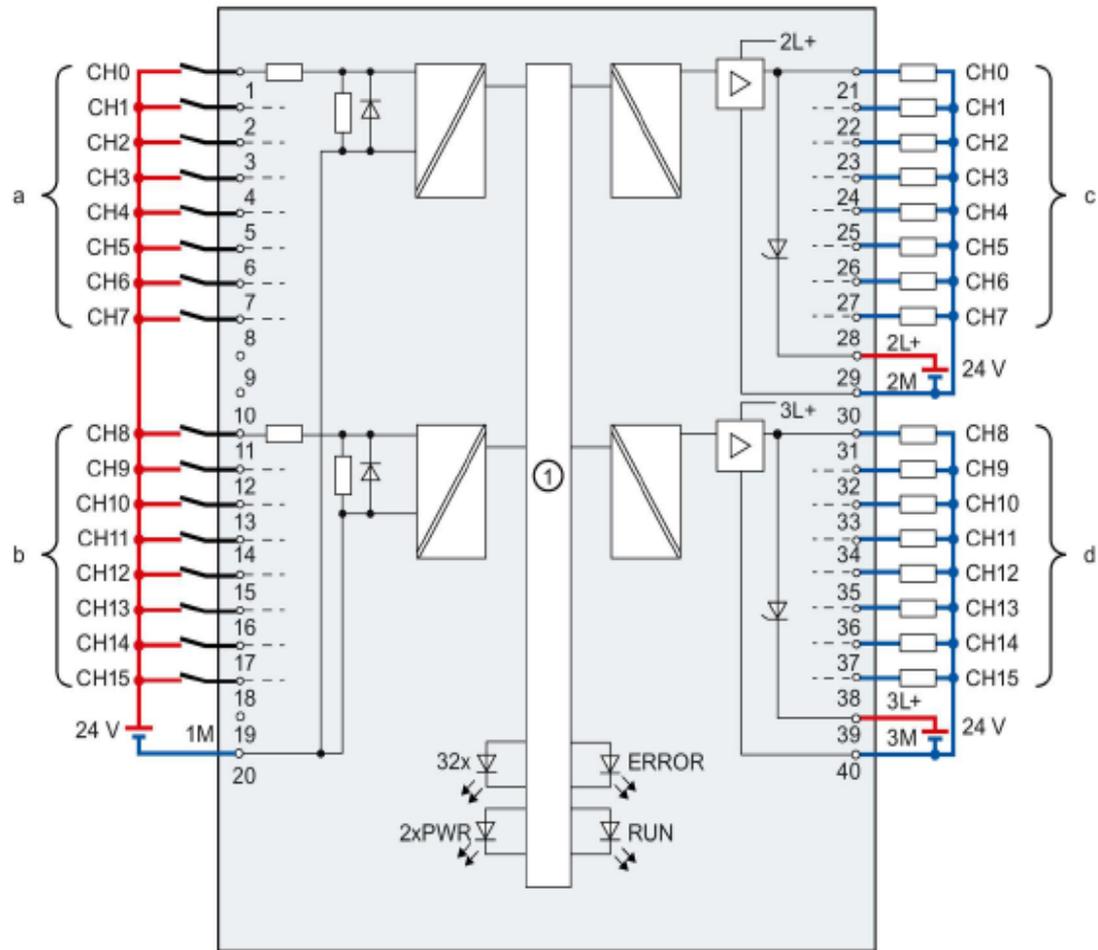
Nota. Obtenido de manual del producto (Siemens, 2016). **Fuente:** Citado en Carbajal-Morán (2021).

Esquema eléctrico

El esquema eléctrico del módulo de entradas y salidas discretas se presenta en la Figura 15.

Figura 15

Esquema eléctrico y asignación de conexiones



①	Bus de fondo	CHx	Canal o LED de estado de canal (verde)
xL+	Tensión de alimentación de 24 V DC	RUN	LED indicador de estado (verde)
xM	Masa	ERROR	LED indicador de error (rojo)
		PWR	LED de tensión de alimentación POWER (verde)

Nota. Obtenido de manual del producto (Siemens, 2016). **Fuente:** Citado en Carbajal-Morán (2021).

Direccionamiento del módulo

El módulo 16 x 24 V DC/DQ 16 x 24 V DC/0.5A es direccionado a partir del submódulo base que corresponde al canal 0-7, y se incrementa en un byte para el siguiente grupo canal 8-15 (ver Figura 16).

Figura 16

Direccionamiento del módulo DI 16x24 VDC/DQ 16x24 VDC/0.5A



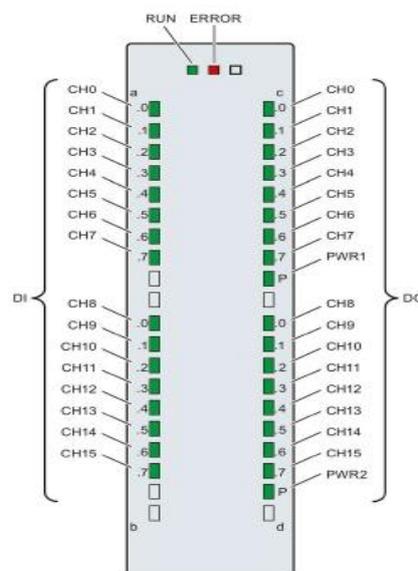
Nota. Obtenido de manual del producto (Siemens, 2016).

Indicadores LED de estados y errores

La Figura 17 visualiza los indicadores LED de cada canal del módulo DI 16 x 24 V DC/DQ 16 x 24 V DC/0.5A.

Figura 17

Indicadores LED del módulo DI 16 x 24 V DC/DQ 16 x 24 V DC/0.5A



Nota. Obtenido de manual del producto (Siemens, 2016).

Significado de los LED

Las tablas 5, 6 y 7, muestran el estado de los LEDs, el significado y la solución a los errores.

Tabla 5

Indicadores LED RUN/ERROR

LED	Significado	Solución
RUN	ERROR	
 Apagado	 Apagado Voltaje bajo o inexistente.	<ul style="list-style-type: none"> • Encienda la unidad central de procesamiento (CPU) y/o módulos del sistema. • Verifique la conexión de los conectores U.
 Parpadea	 Apagado Módulo en arranque.	---
 Encendido	 Apagado El módulo en servicio.	
 Parpadea	 Parpadea Hardware con problemas.	Reemplazar módulo.

Nota. Obtenido de manual del producto (Siemens, 2016).

Tabla 6

Indicador de estados de alimentación

LED PWRx	Significado	Solución
 Apagado	Voltaje que alimenta L+ bajo o nulo	Verificar voltaje en L+.
 Encendido	Correcto voltaje en L+	---

Nota. Obtenido de manual del producto (Siemens, 2016).

Tabla 7

Indicador de estado de canales

LED CHx	Significado	Solución
 Apagado	0 = No registra señal en E/S.	---
 Encendido	1 = Registra señal de E/S.	---

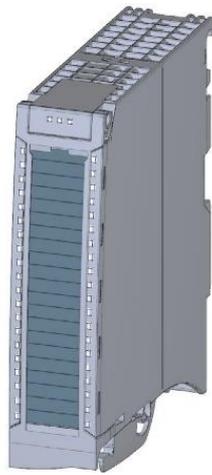
Nota. Obtenido de manual del producto (Siemens, 2016).

b) Módulos de señales analógicas

El módulo S7 1500 AI 8xU/I/RTD/TC ST de la Figura 18, es un componente utilizado en sistemas para automatizar en la industria y el control de procesos, específicamente en el contexto de la serie S7-1500 de controladores lógicos programables fabricados por Siemens (Siemens, 2018). Este módulo tiene varias características notables que lo hacen esencial en aplicaciones para adquirir datos y controlar en entornos industriales.

Figura 18

Módulo para medición de señales analógicas AI 8xU/I/RTD/TC ST



Nota. Obtenido de manual del producto (Siemens, 2018).

El módulo de señales analógicas admite una variedad de señales de entrada, incluyendo señales analógicas (U/I), sensores de resistencia de temperatura (RTD), y termopares (TC). Esto lo convierte en una opción versátil para medir y controlar muchas variables, como nivel, presión, temperatura, flujo, y otros. A continuación, se describe las características importantes y funciones de este módulo:

Características

El módulo AI 8xU/I/RTD/TC ST tiene resoluciones de hasta 16 bits, precisiones de 0.3%; 8 canales, configurable a 4 canales para medir RTD, voltaje en modo común 10 V; permite auto diagnosticar y posee señales de alarma (Siemens, 2018), este módulo presenta las siguientes características que resaltan:

- 8 entradas para señales análogas.
- Medición de voltaje configurable por canal.
- Medición de corriente configurable por canal.
- Configuración para la medición de resistencia por los canales 0, 2, 4 y 6.
- Configuración para la medición de Termorresistencias (RTD) por los canales 0, 2, 4 y 6.
- Configuración por canal para la medición de Termopares (TC).
- Resolución de 16 bits que incluye signo.
- Alarmas con límite superior/inferior.

El módulo AI 8xU/I/RTD/TC ST soporta diversas funciones de actualización de firmware y configuración, que se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8

Funciones del módulo con la versión de firmware

Función	Versión de firmware del módulo	Software para configurar STEP 7 (TIA Portal)
Actualizar firmware	Desde V1.0.0	Desde V12
Identificar datos I&M0 a I&M3	Desde V1.0.0	Desde V12
Re parametrización en RUN	Desde V1.0.0	Desde V12
Modo isócrono	Desde V1.0.0	Desde V12
Calibrar en tiempo de	Desde V1.0.0	Desde V12
Entrada interna compartida del módulo (MSI)	Desde V2.0.0	Desde V13, Update 3 (con PROFINET IO)
Submódulos configurables para dispositivos compartidos.	Desde V2.0.0	Desde V13, Update 3 (solo PROFINET IO)
Configurable detrás del módulo de interfaz IM 155-5	Desde V2.0.0	Desde V13

Nota. Obtenido de manual del producto (Siemens, 2018, p. 12).

Conexión de alimentación

Para proporcionar energía al módulo analógico, se conecta el componente de alimentación al conector frontal. Para realizar esta conexión, se debe asegurar de

que la tensión de suministro se conecte a los terminales 41 (L+) y 44 (M). En caso de requerirlo, se puede utilizar los terminales 42 (L+) y 43 (M) para establecer una conexión en serie con el módulo siguiente, tal como se ilustra en la Figura 19.

Figura 19

Conexión del elemento para alimentar al módulo con 24 V

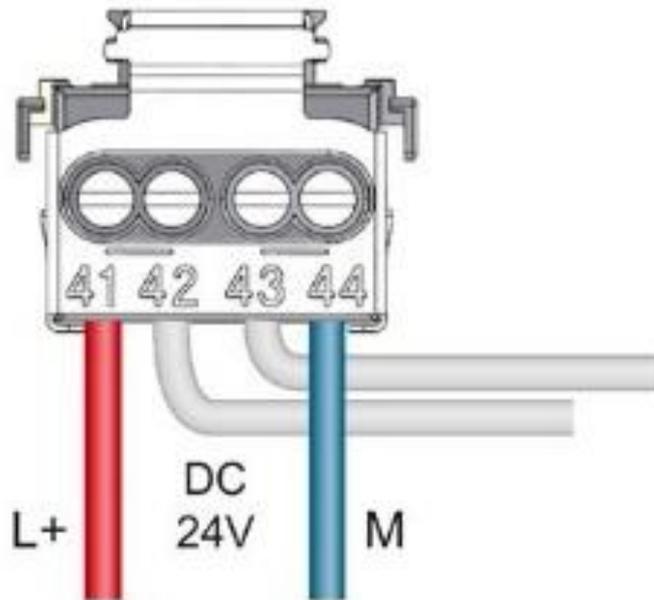
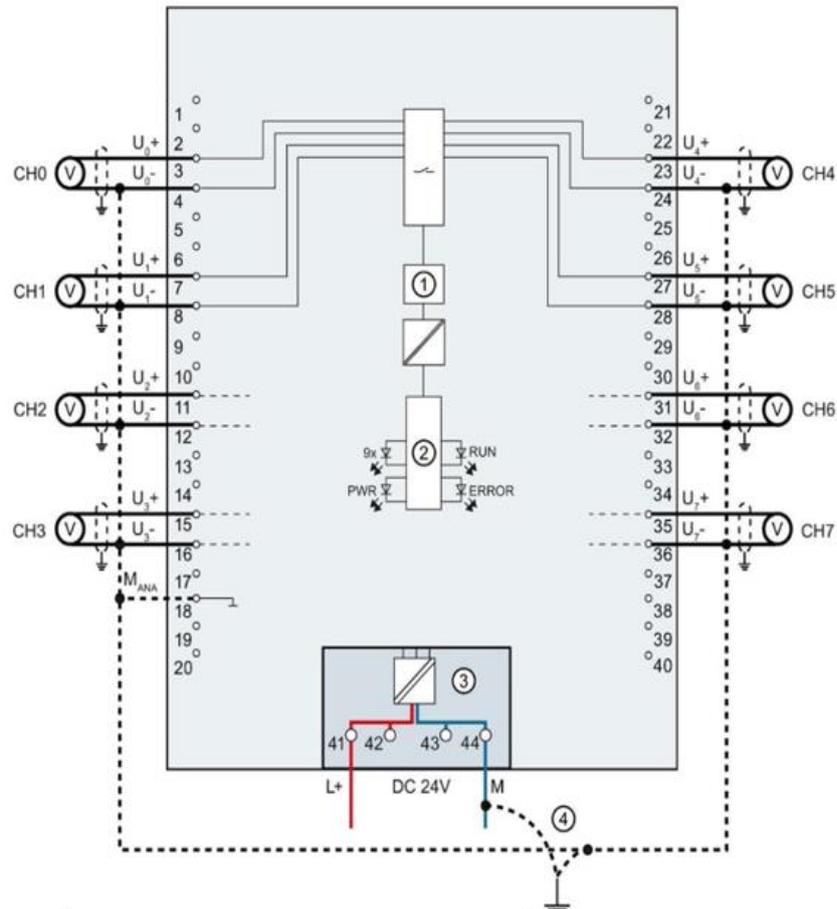


Diagrama de conexiones para medición de tensión

La Figura 20, presenta las diversas conexiones de los canales para medición de tensión o voltaje

Figura 20

Diagrama de conexión de terminales para medición de tensión



- ① Convertidor analógico/digital (CAD) CHx: Canal o a x estado de canal (verde/rojo)
- ② Bus de fondo RUN: LED indicador de estado (verde)
- ③ Tensión de alimentación aplicada en el elemento de alimentación. ERROR: LED indicador de error (rojo)
- ④ Conductor equipotencial (opcional) PWR: LED de tensión de alimentación (verde)

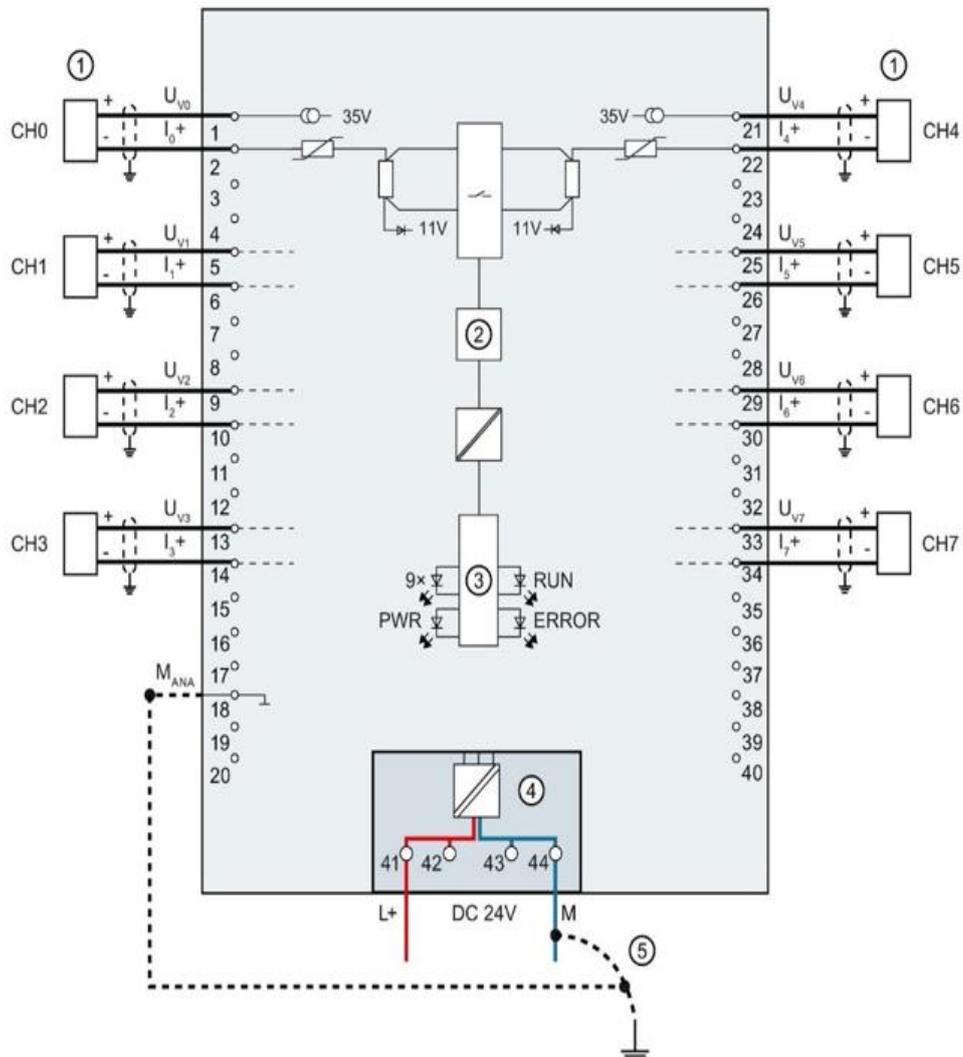
Nota. Obtenido de manual del producto (Siemens, 2018).

Conexión para medir intensidad a 4 hilos

La Figura 21, presenta las conexiones en los terminales para medir la intensidad con transductores de 4 hilos.

Figura 22

Diagrama de conexión de terminales para medir intensidad a 2 hilos



- | | |
|--|---|
| ① Conexión, transductor de medida a 2 hilos. | CHx: Canal o a x estado de canal (verde/rojo) |
| ② Convertidor analógico/digital (CAD) | RUN: LED indicador de estado (verde) |
| ③ Bus de fondo | ERROR: LED indicador de error (rojo) |
| ④ Tensión de alimentación aplicada. | PWR: LED de tensión de alimentación (verde) |
| ⑤ Conductor equipotencial (opcional) | |

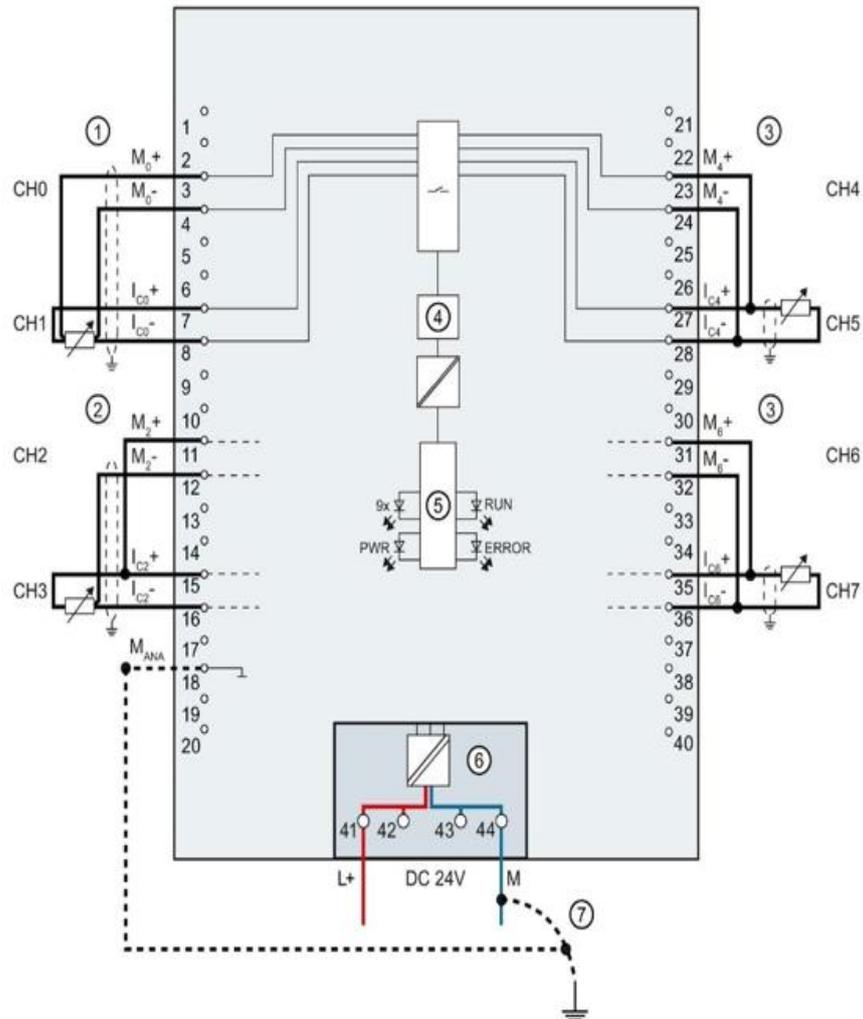
Nota. Obtenido de manual del producto (Siemens, 2018).

Conexiones a 2, 3 y 4 hilos para RTD

La Figura 23, presenta las conexiones en los terminales para medir elementos resistivos a 2, 3 y 4 hilos.

Figura 23

Diagrama de conexión de terminales para medición de elementos resistivos a 2, 3 y 4 hilos



- | | |
|--|---|
| ① Conexión a 4 hilos | CHx: Canal, x estado de canal (verde/rojo) |
| ② Conexión a 3 hilos | RUN: LED indicador de estado (verde) |
| ③ Conexión a 2 hilos | ERROR: LED indicador de error (rojo) |
| ④ Convertidor analógico/digital | PWR: LED de tensión de alimentación (verde) |
| ⑤ Bus de fondo. | |
| ⑥ Tensión de alimentación aplicada en el elemento de alimentación. | |
| ⑦ Conductor equipotencial (opcional). | |

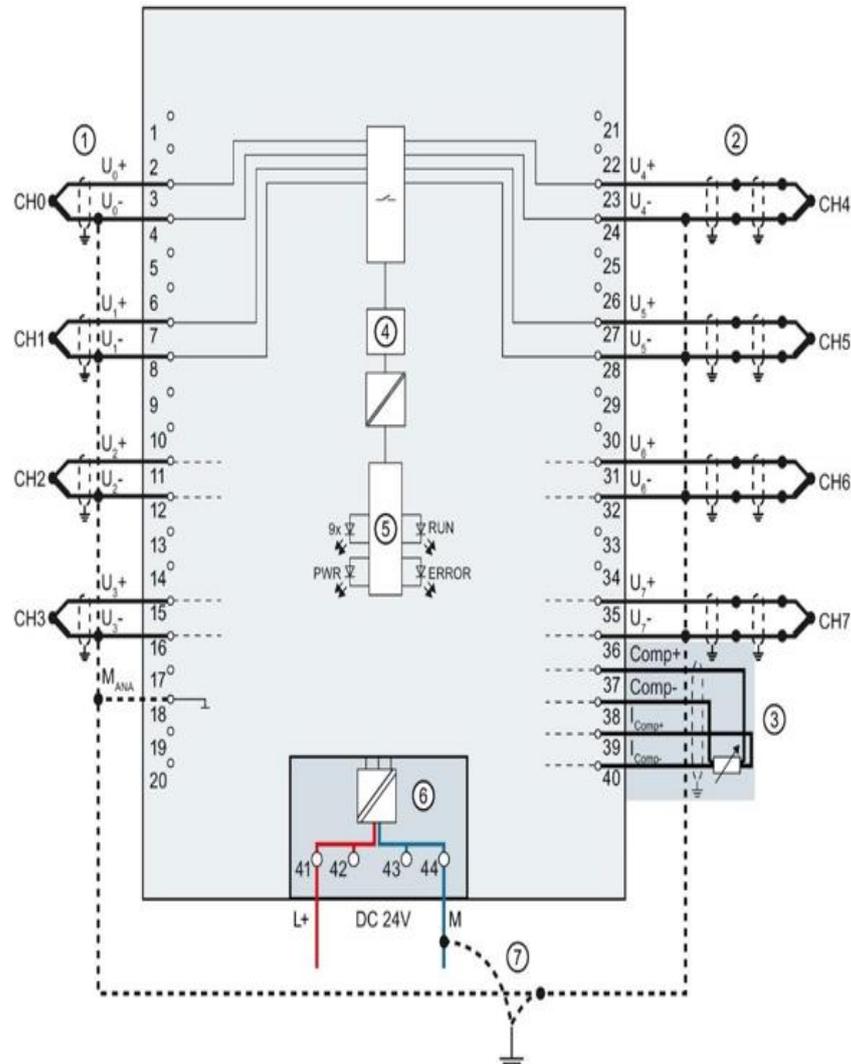
Nota. Obtenido de manual del producto (Siemens, 2018)

Conexión de termopares (RTD) sin puesta a tierra:

La Figura 24, presenta las conexiones en los terminales para medir termopares sin puesta a tierra.

Figura 24

Diagrama de conexión de terminales para medición de termopares sin puesta a tierra



- ① Conexión de termopar (sin puesta a tierra) para compensación interna CHx, estado de canal (verde/rojo)
- ② Conexión de termopar (sin puesta a tierra) RUN: LED indicador de estado (verde)
- ③ Conexión de termorresistencia (RTD) ERROR: LED indicador de error (rojo)
- ④ Convertidor analógico/digital (CAD) PWR: LED de tensión de alimentación (verde)
- ⑤ Bus de fondo.
- ⑥ Tensión de alimentación.
- ⑦ Conductor equipotencial (opcional)

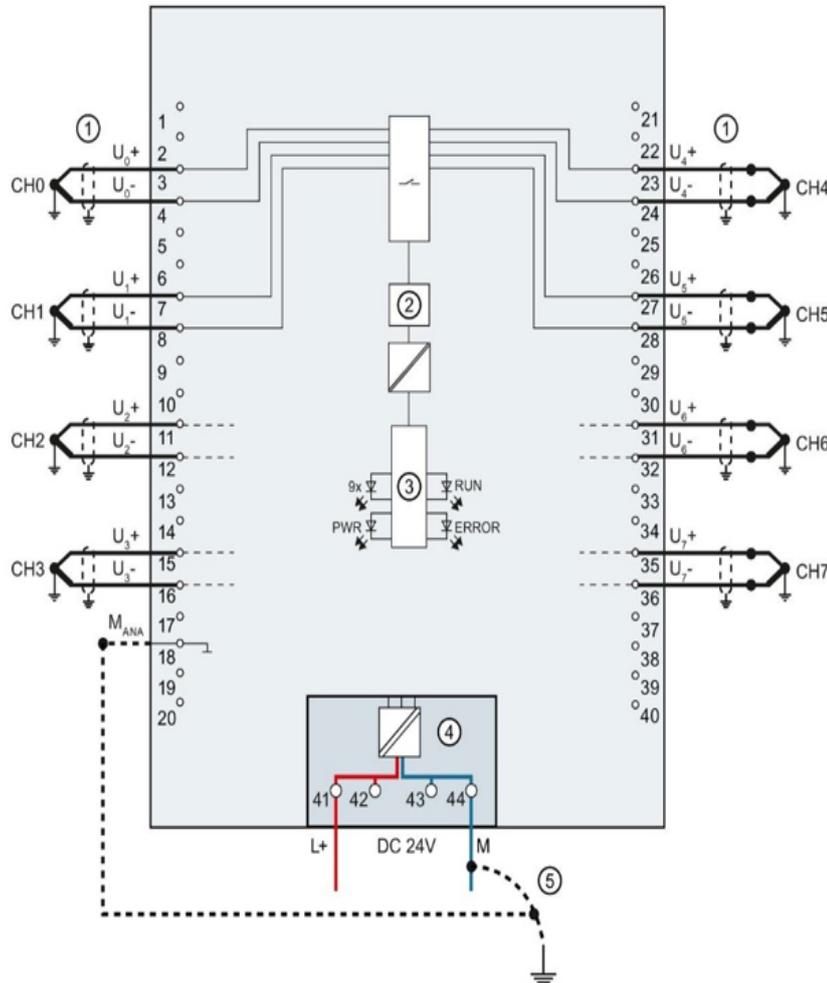
Nota. Obtenido de manual del producto (Siemens, 2018).

Conexión de termopares puestos a tierra

La Figura 25, presenta las conexiones en los terminales para medir termopares con compensación de puesta a tierra.

Figura 25

Diagrama de conexión de terminales para medición de termopares con puesta a tierra



- ① Conexión de termopar (puesto a tierra) para compensación interna CHx, estado de canal (verde/rojo)
- ② Convertidor analógico/digital (CAD). RUN: LED indicador de estado (verde)
- ③ Bus de fondo. ERROR: LED indicador de error (rojo)
- ④ Tensión de alimentación. PWR: LED de tensión de alimentación (verde)
- ⑤ Conductor equipotencial (opcional)

Nota. Obtenido de manual del producto (Siemens, 2018).

Área de direcciones MSI

En la configuración de un módulo de 1 x 8 canales con una entrada compartida (MSI), los canales del 0 al 7 se duplican en hasta 4 submódulos diferentes (Siemens, 2018, p. 35). De esta manera, los canales que abarcan del 0 al 7 poseen idénticos valores de entrada en cada uno de los submódulos. Cuando se utiliza el módulo en un Dispositivo Compartido, es posible asignar estos submódulos a un máximo de cuatro controladores de Entrada/Salida (E/S). Cada uno de estos

controladores de E/S tiene la capacidad de acceder a los mismos canales para efectuar lecturas.

El valor de la información de calidad (QI) puede variar dependiendo del submódulo específico. En el submódulo 1, que es el submódulo base, una QI de "0" señala que el valor es incorrecto. En los submódulos 2 a 4, que son los submódulos MSI, una QI de "0" advierte la existencia de un valor incorrecto o que el submódulo base aún no ha sido parametrizado y falta preparar para su funcionamiento. La Figura 26, presenta la disposición del direccionamiento para los submódulos 1 y 2.

Figura 26

Área de direccionamiento de la memoria imagen de proceso de entradas para los submódulos 1 y 2

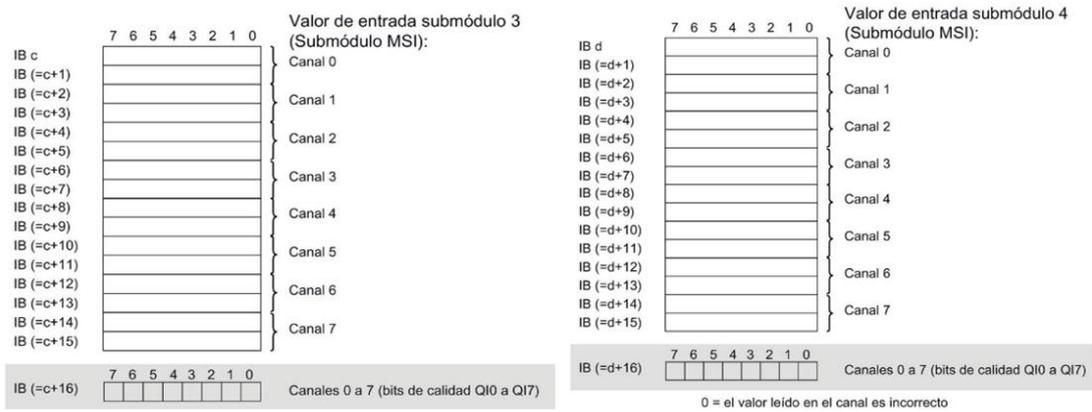


Nota. Obtenido de manual del producto (Siemens, 2018).

La Figura 27, presenta la disposición del direccionamiento para los submódulos 3 y 4.

Figura 27

Área de direccionamiento de la memoria imagen de proceso de entradas para los submódulos 3 y 4.



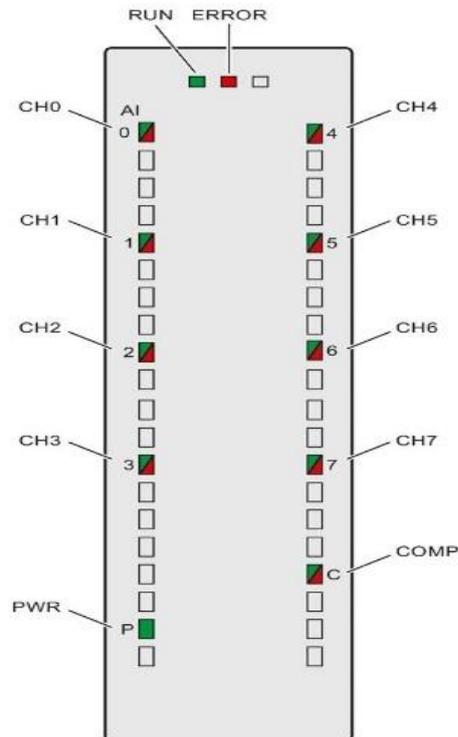
Nota. Obtenido de manual del producto (Siemens, 2018).

Indicadores LED

La Figura 28, presenta los indicadores LED para el módulo AI 8xU/I/RTD/TC ST.

Figura 28

Disposición de indicadores LED para el módulo analógico AI 8xU/I/RTD/TC ST



Nota. Obtenido de manual del producto (Siemens, 2018).

En las tablas 9, 10 y 11 se expone el significado del estado de cada LED y la solución respectiva frente a un error.

Tabla 9

Significado de los estados del LED RUN y ERROR

LEDs		Significado	Solución
RUN	ERROR		
□ Apagado	□ Apagado	Bajo voltaje o inexistente	<ul style="list-style-type: none"> • Conecte la CPU y/o los módulos que alimentan al sistema. • Compruebe conexiones • Compruebe módulos enchufados.
☼ Parpadea	□ Apagado	El módulo se inicia y emite destellos intermitentes hasta que sea configurado adecuadamente.	---
■ Encendido	□ Apagado	El módulo está parametrizado.	---
■ Encendido	☼ Parpadea	Error en módulo, puede ser rotura de hilo	Diagnosticar y corregir error.
☼ Parpadea	☼ Parpadea	Hardware dañado	Cambie el módulo.

Nota. Obtenido de manual del producto (Siemens, 2018).

Tabla 10

Indicador de estado LED PWR

LED PWR	Significado	Solución
□ apagado	Bajo o nulo voltaje de alimentación L+.	Verificar voltaje en L+.
■ encendido	Voltaje de alimentación correcto en L+.	---

Nota. Obtenido de manual del producto (Siemens, 2018).

Tabla 11

Indicador de estado LED CHx y COMP

LED CHx/COMP	Significado	Solución
□ apagado	Canal sin activar.	---
■ encendido	Canal con parametrización correcta.	---
■ encendido	Canal con parametrización (presenta error en canal) indicador de diagnóstico.	Comprobar cableado. Desactivar el diagnóstico.

Nota. Obtenido de manual del producto (Siemens, 2018).

Memoria y capacidad de almacenamiento tarjeta SD

El S7-1500 cuenta con una capacidad de memoria sustancial para almacenar programas, datos y registros históricos (ver Figura 29). Esto es esencial para mantener un registro de las operaciones pasadas, almacenar configuraciones y permitir actualizaciones de software sin problemas.

Figura 29

Tarjeta de memoria SD de 24 MB para PLC



Nota. Obtenido de “How can you use the memory card for the S7 PLC?” (Siemens, 2021a).

La tarjeta de memoria utilizada con el S7-1500 es una tarjeta SD de 24 MB, que se puede utilizar para las siguientes funciones:

- Utilizado como un programa de PLC, es decir, el archivo del proyecto se almacena en la tarjeta de memoria en lugar del PLC. En casos normales,

esto significa que el PLC en sí no tiene un archivo de proyecto y que el PLC no puede funcionar sin esta tarjeta de memoria.

- Se utiliza como intermediario para transferir archivos de proyectos a muchos otros PLC S7-1500, e incluso PLC S7 1200.
- Se utiliza para restablecer de fábrica el dispositivo en caso de que olvidemos la contraseña del PLC.
- Se puede usar para actualizar la versión de firmware del S7-1500 (se recomiendan 24 MB o más porque, si es más pequeño, no almacenará archivos de firmware).

Comunicación y conectividad

Este PLC está diseñado para integrarse con sistemas de comunicación industriales. Ofrece una variedad de interfaces y protocolos de comunicación, como PROFINET y Ethernet, que permiten la comunicación con otros dispositivos, como HMI, sistemas SCADA y otros PLC. Esta conectividad es esencial para la recopilación de datos y la integración de sistemas en la automatización industrial moderna (Peciña, 2018).

Seguridad

El PLC S7-1500 incorpora características de seguridad avanzadas, como funciones de protección de acceso y autenticación, que ayudan a garantizar que solo personal autorizado pueda acceder y realizar modificaciones en el sistema de control (Berger, 2017); esto es especialmente importante en entornos críticos donde la seguridad del funcionamiento del equipo y la protección del algoritmo del programa es prioritario, para un correcto y eficiente funcionamiento del equipo dentro de una determinada aplicación.

2.2.2 Programación del PLC S7-1500

La programación del PLC S7-1500 es un aspecto fundamental en la automatización industrial, ya que permite definir la lógica de control que supervisará y dirigirá un proceso específico; el PLC S7-1500 ofrece varias

opciones de programación para adaptarse a diferentes necesidades y preferencias de los desarrolladores (Pirraglia, 2018).

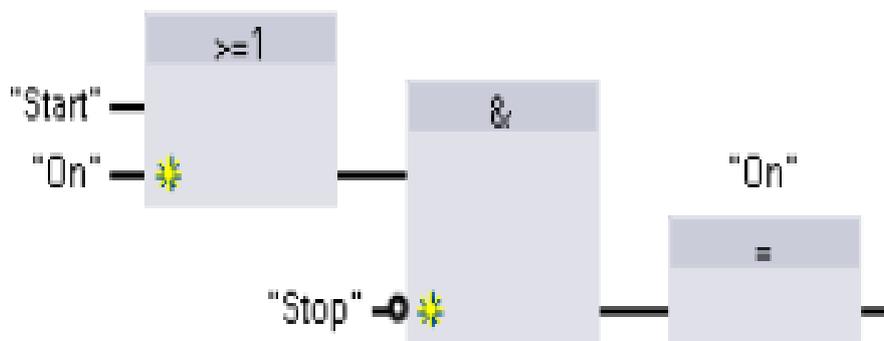
La programación del PLC S7 1500 se realiza en base a la norma DIN EN-611313 (IEC 61131-3). El lenguaje SCL es de más alto nivel que incluye componentes de lenguaje típicos de los PLC, como, por ejemplo, entradas, salidas, temporizadores, marcadores, llamadas de bloques, entre otros (Siemens AG, 2017). Se desarrollan los programas en STEP 7 que se encuentra contenido en TIA Portal. Seguidamente, se detalla los lenguajes de programación comúnmente usados con el PLC S7-1500 en automatización industrial:

Lenguaje de programación de bloques de funciones (FBD)

Este lenguaje emplea bloques de funciones gráficos para simbolizar la lógica de control (ver Figura 30). Es especialmente útil para representar procesos secuenciales y diagramas de flujo.

Figura 30

Programación en bloque de funciones (FBD)



Nota. Diagrama elaborado en TIA Portal.

Lenguaje de programación de escalera (KOP)

Similar a los diagramas de escalera eléctrica, este lenguaje utiliza contactos, bobinas y temporizadores para expresar la lógica de control (ver Figura 31), es muy utilizado en la industria y es fácil de comprender, como contacto NO, NC y salida, etc.

Figura 31

Programación de escalera (KOP)



Nota. Diagrama elaborado en TIA Portal.

Lenguaje de control estructurado (SCL)

Este lenguaje se basa en la programación estructurada y es adecuado para aplicaciones más complejas y matemáticas; permite la creación de programas detallados con estructuras de control avanzadas (Siemens AG, 2017). Una vez que se haya terminado de construir un bloque SCL, se puede colocar este bloque en un programa en otros bloques escritos en LAD o FBD. El lenguaje SCL utiliza operadores estándar de programas como "Igual" está representado por " := "; sumar, restar, multiplicar, dividir, denotado por + - * / respectivamente, etc.

La operación se basa principalmente en estándares PASCAL. Debido a la semejanza con PASCAL, este tipo de escritura es adecuada para operaciones condicionales, bucles y operaciones de anidación, que permiten realizar comandos complejos más fácilmente que LAD y FBD. Como ejemplo de uso de SCL se tiene:

```
"C" := #A + #B;           Asigna 2 variables locales a la etiqueta
"Data_block_1". Etiqueta := #A; Establece la etiqueta de bloque de datos
IF #A > #B THEN "C" := #A; Sentencia IF-THEN
"C" := SQRT (SQR (#A) + SQR (#B)); Comando para sacar raíz cuadrada
```

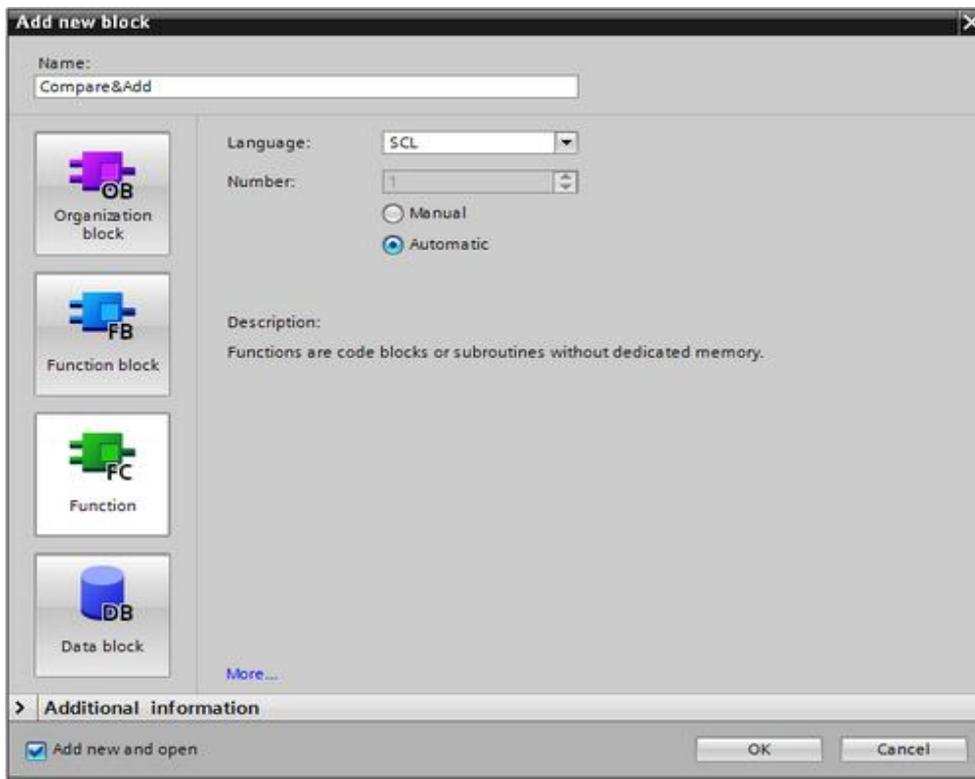
Del comando anterior, SCL tiene el formato de comando estándar básico de la siguiente manera:

- Declaración de igualdad: =
- Comandos matemáticos que usan +, -, *, /
- La variable global usa la forma "nombre de etiqueta" como "C" (la etiqueta está entre comillas)
- Uso de la variable local #variable nombre como #A y #B etc.
- Para usar directamente se usa % dirección como: %I0.0, %MW10 etc.
- En los cálculos matemáticos, podemos combinar los tipos de datos disponibles en la ecuación. El tipo de datos de los resultados depende de los más importantes. Por ejemplo, si multiplicamos INT multiplicado por REAL, el resultado será REAL.

El procedimiento para creación del programa en SCL se detalla desde la Figura 32 hasta la Figura 37:

Figura 32

Creación de un nuevo FC con idioma SCL

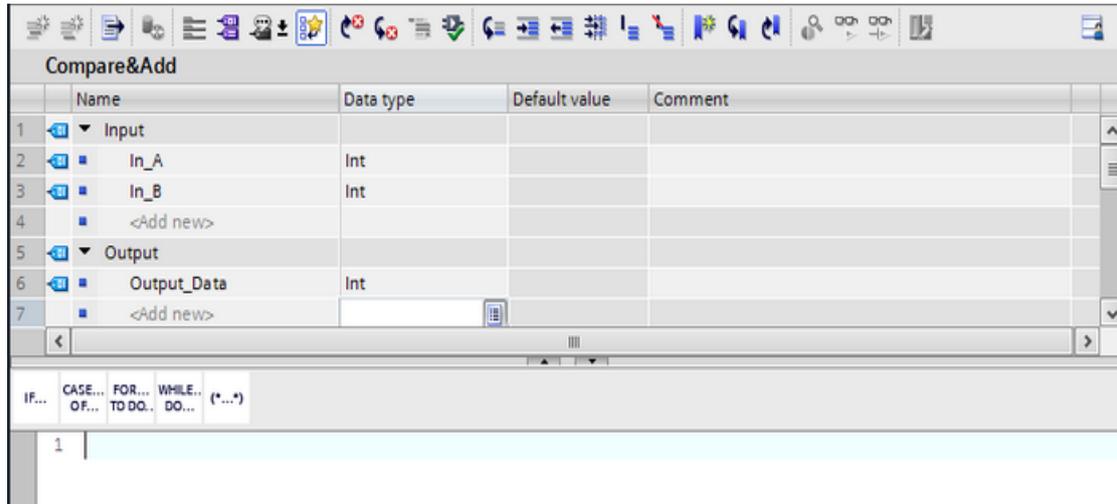


Nota. Imagen obtenida de TIA Portal.

Seguidamente, se crea la variable In_A, In_B en el lado de entrada, se establece los datos en Int y variable Output_Data en el lado de salida, en tipo Int.

Figura 33

Creación de variables de entrada In_A y In_B, y variable de salida Output_Data en tipo Int

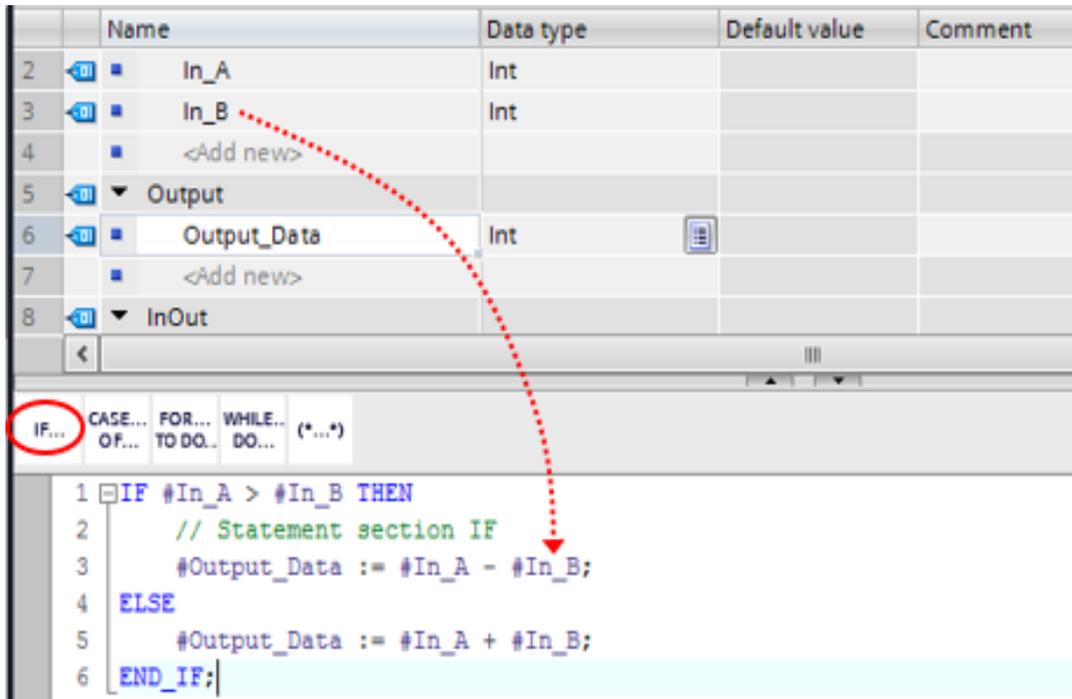


Nota. Imagen obtenida de TIA Portal.

Luego, escriba la instrucción SCL como en el ejemplo, observando que se puede hacer clic en la palabra IF. para que el programa escriba la instrucción IF-THEN. Para las variables, se arrastra y suelta desde la parte superior a la sección de escritura SCL. No tiene que preocuparse por si escribe la variable de forma incorrecta o si no utiliza la variable (si se usa Global DB, también se puede arrastlarla desde Global DB a la parte SCL) (ver Figura 34).

Figura 34

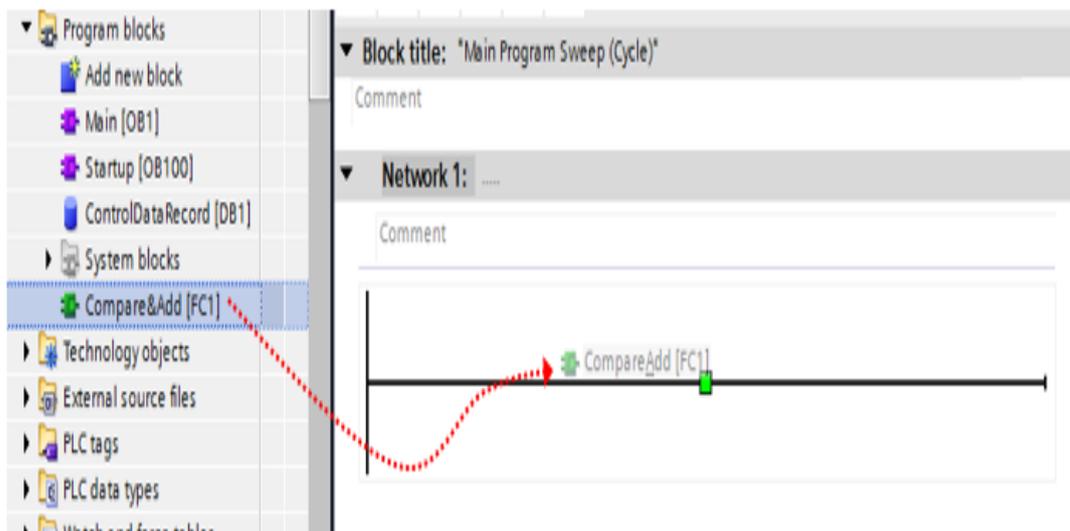
Procedimiento de la sintaxis SCL: Instrucciones y uso de variables en el programa



Nota. Imagen obtenida de TIA Portal.

Figura 35

Apertura de OB1 desde el FC y colocación en la Red

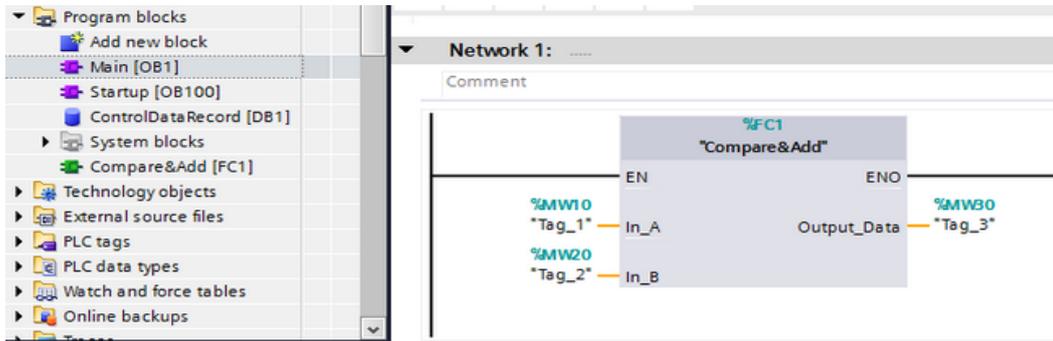


Nota. Imagen obtenida de TIA Portal.

Posteriormente, complete todas las variables para In_A, In_B y Output_Data (ver Figura 36).

Figura 36

Adición de las variables para In_A, In_B y Output_Data

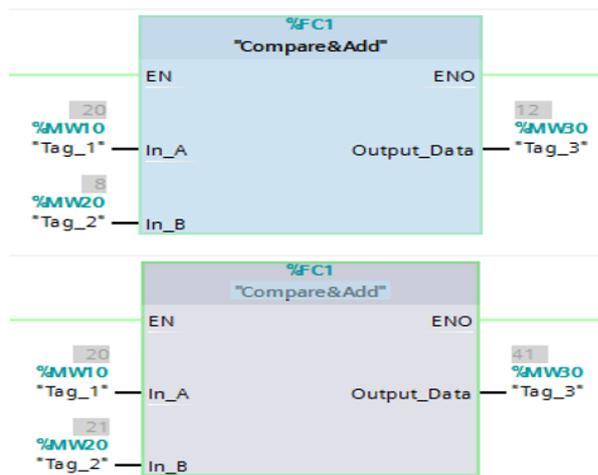


Nota. Imagen obtenida de TIA Portal.

Como resultado se ve que cuando In_A es mayor que In_B, sobrescribirá el valor y lo almacenará en Output_Data, pero lo agregará si la In_A es menor que In_B.

Figura 37

Comparación entre In_A e In_B en Output_Data



Nota. Imagen obtenida de TIA Portal.

Lenguaje de programación Grafcet (SFC)

Se trata de un lenguaje gráfico que describe la operación o el funcionamiento de una máquina o proceso (Guerrero Saiz, 2019). Esta norma, conocida como "DIN EN 60848" ha estado en vigencia por más de 14 años y fue desarrollada en Francia. El término "Grafcet" es una abreviatura de "Graphe Fonctionnel de Commande Etape Transition" que se traduce como "La representación de funciones de control con etapas y transiciones". Esta notación permite describir de manera

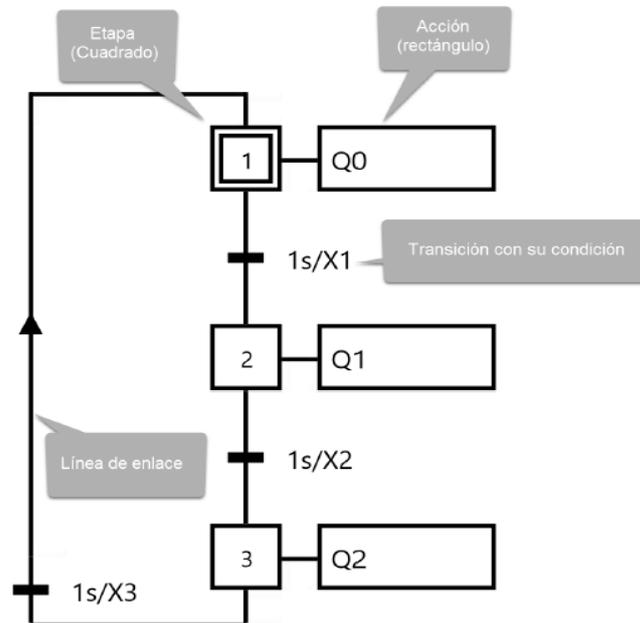
efectiva secuencias de etapas o secuenciadores en un sistema (ver Figura 32). En un diagrama Grafcet, se utilizan los siguientes elementos:

- ✓ **Etapas (representadas por cuadrados):** Cada etapa puede estar en un estado activo o inactivo, lo que indica el estado actual de la máquina o proceso (por ejemplo, si una botella ha sido llenada).
- ✓ **Transiciones (representadas por líneas horizontales perpendiculares que cruzan las líneas de conexión):** Las transiciones incluyen condiciones. Si se cumple una condición específica, la transición permite el paso a la siguiente etapa o la activación de un paso adicional, desactivando la etapa anterior.
- ✓ **Acciones (representadas por rectángulos):** Las acciones siempre están asociadas a una etapa particular. Estas acciones pueden influir en dispositivos o interruptores, como válvulas, y es posible establecer varias acciones en una misma etapa.
- ✓ **Líneas de conexión (representadas por líneas horizontales y verticales):** Estas líneas conectan todos los elementos individuales, como etapas, transiciones y acciones, permitiendo la representación visual de la secuencia y lógica del proceso.

Además, Grafcet provee elementos, jerarquías y estructuras que permiten establecer instrucciones de control forzados. Estos comandos se utilizan para implementar un funcionamiento específico de la máquina bajo ciertas condiciones (por ejemplo, modo manual o automático) y permiten un mayor control sobre el proceso.

Figura 38

Elementos de un diagrama Grafcet



Nota. Imagen adaptada de “Grafcet-Studio” (GmbH & Co., 2022).

Un diagrama Grafcet se crea sobre TIA Portal y se transfiere a un dispositivo PLC S7 1500, lo que abre oportunidades en varios campos de aplicación y proporciona diversas ventajas. Este lenguaje utiliza diagramas gráficos que son intuitivos y fáciles de entender, lo que simplifica la programación y el mantenimiento del PLC (Guerrero Saiz, 2019). La programación Grafcet permite diseñar el programa de control de manera estructurada, dividiendo el sistema en etapas y transiciones lógicas, lo que facilita la organización y la detección de errores.

Grafcet permite dividir el programa en módulos más pequeños y manejables, lo que facilita el desarrollo y la depuración del software. Puede adaptarse a cambios en el sistema sin necesidad de reescribir grandes secciones de código, lo que hace ideal para sistemas en constante evolución. Así mismo, los bloques con funciones específicas pueden reutilizarse en diferentes sistemas o proyectos, lo que ahorra tiempo y recursos (GmbH & Co., 2022); este lenguaje se integra perfectamente con el hardware del PLC S7-1500, lo que facilita la implementación de soluciones de control; siendo una excelente herramienta para la automatización.

Entorno de desarrollo (TIA Portal)

Siemens proporciona un entorno de desarrollo integrado llamado TIA Portal (*Totally Integrated Automation Portal*) que es utilizado para programar y configurar el PLC S7-1500. TIA Portal ofrece herramientas de programación, simulación y depuración que facilitan crear y mantener los programas de control (Siemens, 2023a). El TIA Portal es una plataforma de software que proporciona un entorno de programación unificado para diferentes componentes de automatización de Siemens, esto simplifica significativamente el desarrollo y puesta en marcha, lo que ahorra tiempo y recursos en la implementación de proyectos de automatización, el software para prueba puede descargarse de la página web de Siemens (Siemens, 2023a). Para los procesos de desarrollo TIA Portal integra los siguientes softwares:

- ✓ **SIMATIC STEP 7:** Es el software de ingeniería permite la configuración de la familia de PLC SIMATIC S7-1200, S7-1500, S7-300/400, así como, controladores por software (WinAC) (Siemens, 2023b; Siemens, 2021b). Hay disponibles dos ediciones de STEP 7, cuyo uso depende de las familias de controladores a configurar: STEP 7 Basic para la configuración del PLC S7-1200 y STEP 7 Professional, para configuración de PLC S7-1200, S7-1500, S7-300/400.
- ✓ **SIMATIC WinCC:** Es un software de ingeniería para desarrollar en SIMATIC Panels, PC industriales SIMATIC y PC estándar, con el software de visualización *WinCC Runtime Advanced* o el sistema SCADA *WinCC Runtime Professional* (Sheng et al., 2018). WinCC se ofrece en varias ediciones según los sistemas de operador configurables. Estas ediciones incluyen WinCC Basic, que se utiliza para configurar los Basic Panels; WinCC Comfort, destinado a la configuración de todos los Panels; WinCC Advanced, utilizado para configurar tanto Panels como PCs con el software de visualización *WinCC Runtime Advanced*. *WinCC Runtime Advanced* es un software de visualización diseñado para sistemas monopuesto basados en PC. Por otro lado, WinCC Professional se utiliza para configurar Panels y

PCs con *WinCC Runtime Advanced* o el sistema SCADA y está disponible en las ediciones de 512 y 4096 PowerTags. *WinCC Runtime Professional* es un sistema SCADA que permite crear configuraciones para sistemas mono - multi multipuesto para clientes estándar o web.

- ✓ **SIMATIC WinCC Unified:** Es el moderno software de visualización que proporciona funciones de visualización a diferentes plataformas. Los proyectos *WinCC Unified* se configuran unitariamente en TIA Portal (Siemens, 2019c). La compatibilidad con tecnologías web como HTML5, SVG y JavaScript permite acceder fácilmente a funciones de visualización por medio de un navegador web, sin que sea necesario instalar aplicaciones o complementos adicionales. *WinCC Unified* ofrece un escalado flexible, desde el panel de control directamente junto a la máquina hasta complejas soluciones basadas en PC. *WinCC Unified* está disponible en las siguientes ediciones: *WinCC Unified Comfort* para la visualización en *Unified Comfort Panels* y *WinCC Unified PC* para la visualización en *Unified PC*.
- ✓ **SINAMICS Startdrive:** Es el software de puesta en marcha para la integración de accionamientos SINAMICS en la automatización (Siemens, 2021b). SINAMICS Startdrive existe en dos variantes: Startdrive Basic para la puesta en marcha, optimización y diagnóstico de los sistemas de accionamiento SINAMICS S120, S150, S210 y G115D, G120, G120C, G120D, G130, G150 y *Startdrive Advanced* con todas las funciones de SINAMICS Startdrive Basic y, además, pruebas de recepción de seguridad integradas para SINAMICS S120, S210, G125D y G120.
- ✓ **SIMOTION SCOUT TIA:** Es el software de ingeniería para la programación, parametrización, configuración, prueba y puesta en marcha del sistema de Motion Control SIMOTION D, basado en accionamiento; SIMOTION C, basado en PLC y SIMOTION P, basado en PC (Siemens, 2022).

2.2.3 Comunicación y conectividad

Las capacidades de comunicación del PLC S7-1500 son fundamentales para su papel en la automatización industrial moderna. Este PLC de Siemens proporciona una amplia gama de opciones para la comunicación efectiva con otros dispositivos, sistemas y software.

Los PLC permiten la conectividad a los sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), siendo fundamentales para la visualización y el control de procesos industriales (Corona Ledesma, 2022); el PLC S7-1500 es compatible con SCADA a través de protocolos estándar, como OPC (*OLE for Process Control*) y OPC UA (*Unified Architecture*); la integración con sistemas SCADA permite a los operadores y supervisores monitorear y controlar procesos en tiempo real, visualizar datos, realizar análisis y tomar decisiones basadas en la información recopilada (Siemens, 2019a).

El PLC S7-1500 está diseñado para integrarse a diferentes redes industriales, lo que facilita la integración en sistemas de control complejos. PROFINET (*Process Field Network*) es uno de los protocolos más utilizados y es ampliamente compatible con este PLC (Peciña, 2018). También es posible utilizar Ethernet/IP y otros protocolos de comunicación industrial. La integración en redes industriales permite una comunicación fluida entre el PLC, otros controladores, E/S distribuidas y dispositivos periféricos. Esto es fundamental para coordinar y sincronizar diferentes partes de un sistema de automatización. El PLC S7-1500 puede comunicarse con una amplia variedad de dispositivos periféricos en una determinada red; como variadores de frecuencia, motores, sensores y actuadores, a través de interfaces y protocolos estándar de la industria. Esto permite la coordinación y el control efectivo de todo el sistema de automatización.

2.2.4 Aplicaciones del PLC en control de procesos

El PLC se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones en la automatización y control de diversos procesos, es de relevancia en nuestro estudio el control de los procesos de fotocátalisis.

En procesos de fotocátalisis, el PLC se utiliza para controlar y supervisar procesos químicos y fotocatalíticos. Esto incluye la administración de reactores y equipos de dosificación para la eliminación de contaminantes orgánicos e inorgánicos en aguas residuales y la desinfección del agua. Previamente se debe contar con los sensores adecuados que miden los diferentes parámetros físico-químicos del agua. El PLC garantiza la precisión y la seguridad en la gestión de estos procesos complejos. En este contexto se tiene el estudio de Cabezas et al. (2016), en el trabajo "*Life WaterReuse: Gestión eficiente del agua en industrias con elevada carga orgánica*" emplea un PLC conectando las señales del proceso (DBO, DQO, pH, conductividad, turbidez, entre otros) para su control automático; la configuración de los valores deseados se realizó a través de un sistema tipo SCADA, el uso de controladores PID (Proporcional Integral Derivativo) permitiendo lograr una operación automática y alcanzar los puntos de funcionamiento óptimos.

Por otro lado, el PLC se emplea en el control de máquinas industriales, principalmente en la manufacturera para controlar máquinas industriales, como prensas, máquinas de embalaje, cortadoras y robots. El PLC garantiza la precisión y la sincronización de movimientos en máquinas complejas, lo que es esencial para mantener la calidad del producto y la eficiencia de la producción (Daneri, 2009).

Así mismo, el PLC se utiliza para automatizar una variedad de procesos, como líneas de montaje, control de procesos químicos, manipulación de materiales, control de calidad y seguimiento de producción. Estos sistemas mejoran la eficiencia, reducen los errores y permiten una producción continua y de alta calidad (Daneri, 2009). También, el PLC se emplea en aplicaciones de gestión de energía, para controlar sistemas de generación y distribución de energía eléctrica. Esto incluye la administración de generadores, interruptores, transformadores y la monitorización de la calidad de la energía desde los sensores, en entornos industriales y de servicios públicos.

CAPÍTULO III

FOTOCATÁLISIS SOLAR EN LA RECUPERACIÓN DE AGUAS GRISES PARA AGRICULTURA: INNOVACIÓN Y EFICIENCIA POR CONTROL DE PROCESOS CON PLC S7-1500

3.1. Razones de la investigación

Las razones que impulsaron el desarrollo de esta investigación fueron: buscar y desarrollar un sistema que permita la recuperación de aguas grises empleado fotocatalisis solar para riego agrícola, considerando: la conservación de los recursos hídricos, que permita el acceso a agua limpia y suficiente siendo esencial para la agricultura. Utilizar aguas grises tratadas para el riego de cultivos permite conservar agua potable y disminuir la demanda de agua dulce, contribuyendo a la gestión sostenible del recurso hídrico.

Es importante el aporte a la sostenibilidad ambiental; los procesos fotocatalíticos solares que emplean dióxido de titanio, son parte de una tecnología respetuosa del medio ambiente, el uso de esta tecnología puede ayudar a disminuir la contaminación del agua y los efectos adversos en el entorno natural. Reduciendo costos agrícolas; ya que el riego es una de las principales demandas de agua en la agricultura. El uso de aguas grises tratadas puede reducir los costos asociados con el uso de agua y los sistemas de tratamiento convencionales.

Así mismo, permite mitigar la falta de agua en lugares propensas a la sequía, el acceso a fuentes alternativas de agua, como las aguas grises tratadas, puede ser crítico para mantener la agricultura y evitar pérdidas significativas de cultivos. El uso de aguas grises con tratamiento para riego disminuye la huella hídrica de la agricultura, lo que es un aspecto de importancia para la gestión sostenible de recursos hídricos. Por lo que la investigación responde a la pregunta: ¿Cuál es modelo óptimo del sistema fotocatalítico solar con dióxido de titanio para recuperar aguas grises para riego de cultivos?

3.2. Objetivo de la investigación

La investigación tuvo como objetivo principal determinar el modelo óptimo del sistema fotocatalítico solar empleando dióxido de titanio para recuperar aguas grises para riego agrícola.

Para lograr el objetivo principal, se formularon objetivos específicos que se centraron en varios aspectos, tales como la evaluación de la influencia de la

radiación ultravioleta (IUV) solar, la determinación de la cantidad adecuada de nanopartículas de dióxido de titanio, dentro del rango de 1 a 2 gramos por litro, y el análisis del impacto del tiempo de exposición del fotocatalizador a la radiación solar.

Además, se buscó establecer una expresión matemática que relacione todas las variables de estudio, creando así un sistema para recuperar aguas grises mediante fotocátalisis solar. Este modelo tuvo en cuenta la intensidad de la radiación ultravioleta proveniente del Sol, la cantidad de TiO_2 y la duración de exposición solar.

Por último, se tuvo como objetivo evaluar la eficacia del fotocatalizador solar, controlado por un PLC S7 1500, en el proceso de recuperación de aguas grises para su posterior utilización en riego agrícola.

3.3. Método, diseño y tipo de investigación

En el marco de la investigación, se usó el método inductivo en el análisis de muestras del agua en tratamiento, el método deductivo se utilizó en la evaluación de la calidad del agua, y se recurrió al método experimental para el análisis de las variables del estudio en un entorno controlado (Bairagi & Munot, 2019; Hernández & Mendoza, 2018). La metodología se desarrolló en tres etapas: en la primera etapa se procedió a la caracterización de las aguas grises. En la segunda etapa, se recopilaron datos relativos a los parámetros del agua en el transcurso de los procesos de tratamiento en el sistema de recuperación que emplea la fotocátalisis solar con dióxido de titanio. Finalmente, en la tercera etapa, se efectuó un análisis estadístico y se perfeccionó el proceso, lo que condujo al desarrollo de un modelo con valores que permitieron recuperar con éxito las aguas grises destinadas al riego agrícola en el marco del ECA-Agua.

La investigación corresponde al tipo aplicado; el diseño de investigación fue de naturaleza experimental, en el que las variables independientes fueron deliberadamente modificadas, registrándose los impactos en la variable dependiente (Carrasco, 2019; Hernández & Mendoza, 2018, p. 149). Inicialmente,

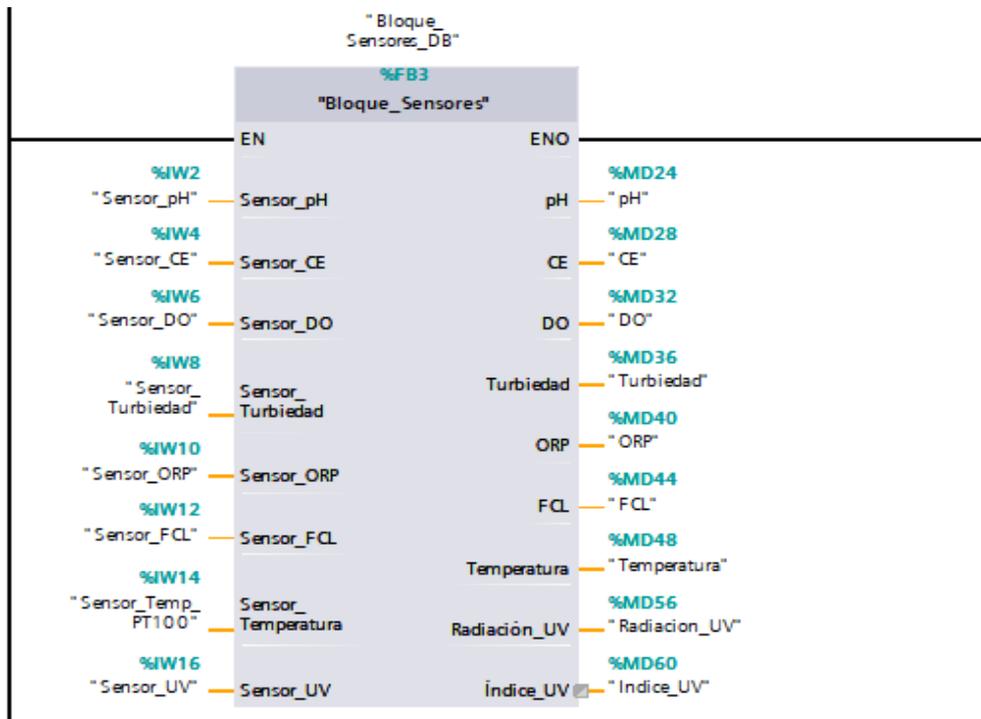
se usó el diseño central compuesto (DCC), el cual incorporó tres factores estimulantes, a saber, "IUV, TiO₂ y Tiempo", que se aplicaron al agua que estaba en proceso de recuperación mediante fotocátalisis solar. Estos factores se codificaron en tres niveles: alto, medio y bajo, representados como (1, 0, -1). Esto resultó en la configuración de seis puntos centrales y seis puntos axiales, generando 20 observaciones, luego se procedió a la optimización generando 13 observaciones finales. Este diseño se seleccionó por su eficacia en el análisis de datos a través de la metodología de superficies de respuesta (Melo et al., 2020).

Procedimientos para obtención de datos

Se utilizaron equipos previamente ajustados y validados para la recopilación de datos, con el objetivo de medir los seis parámetros del agua: pH, conductividad eléctrica (CE), oxígeno disuelto (DO), cloro libre residual (FCL), potencial de oxidación-reducción (ORP) y turbidez. Estos dispositivos se integraron mediante un módulo de adquisición de señales analógicas al PLC S7 1500, lo que se ilustra en la Figura 33. Los datos adquiridos con los sensores que incorporan transductores de corriente de 4 a 20 mA, se sometieron a un proceso de normalización y escalamiento.

Figura 39

Bloque de sensores conectados a módulo de entrada analógica del PLC S7 1500



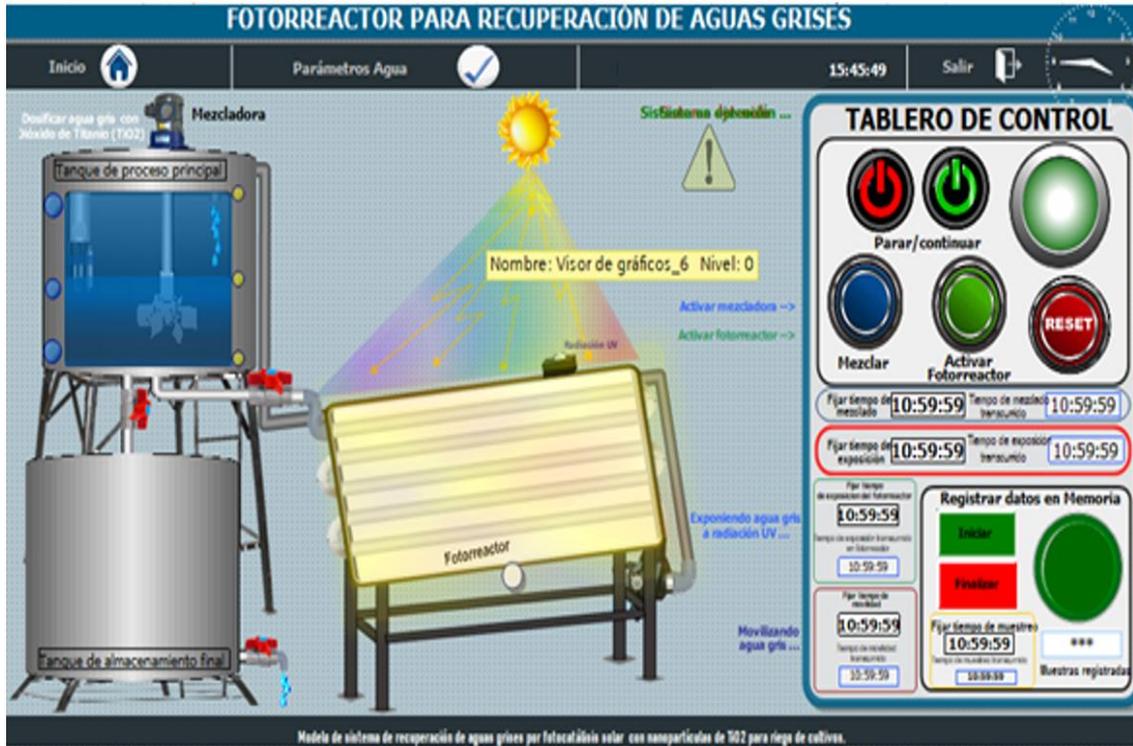
Nota. Bloque de sensores que contiene la normalización y escalamiento de las señales. **Fuente:** Carbajal-Morán (2021).

Este PLC, siguiendo el algoritmo establecido, transmite los datos capturados desde los sensores y transductores visualizándose en un dispositivo HMI que ha sido desarrollada en el software WinCC de TIA Portal, lo que se ilustra en la Figura 34.

La supervisión y gestión, del proceso de mezcla del TiO_2 en las aguas grises, se llevó a cabo desde la interface HMI. Esto implicó programar tanto la activación como la duración de este procedimiento. Asimismo, se controló el traslado de esta mezcla al fotorreactor, donde se expuso al Sol durante un período programable específico. También, se gestionó la descarga del líquido tratado hacia el tanque de almacenamiento definitivo.

Figura 40

Interface HMI y tablero de control para programar el tiempo de duración del proceso



Nota. Tomado de *Interface implementada en WinCC de TIA Portal* por Carbajal-Morán (2021).

Una vez completados los 20 experimentos iniciales, los cuales se llevaron a cabo siguiendo el DCC que incorpora 06 puntos centrales y 06 puntos axiales derivados del muestreo, se obtuvieron valores que están detallados en la Tabla 12. Las variables de proceso (IUV, TiO_2 y Tiempo) fueron codificados (x_1 , x_2 y x_3), siendo “y” la salida que representa el índice de calidad del agua, obtenida con la metodología ICA-PE en %.

Tabla 12

Valor del índice de evaluación de la calidad del agua para las muestras en los seis puntos centrales y seis puntos axiales del diseño de experimento inicial

Obs.	Orden de ejecución	Variables de proceso			Codificación			ICA-PE%
		IUV	TiO ₂ (g/L)	Tiempo (min)	x_1	x_2	x_3	Y
Obs1	1	4	1	30	-1	-1	-1	34.98
Obs2	2	13	1	30	1	-1	-1	55.63
Obs3	3	4	2	30	-1	1	-1	39.31
Obs4	4	13	2	30	1	1	-1	86.21
Obs5	5	4	1	60	-1	-1	1	38.40
Obs6	6	13	1	60	1	-1	1	86.34
Obs7	7	4	2	60	-1	1	1	56.49
Obs8	8	13	2	60	1	1	1	86.35
Obs9	9	0.93	1.5	45	-1.68	0	0	34.10
Obs10	10	16.07	1.5	45	1.68	0	0	86.30
Obs11	11	8.5	0.66	45	0	-1.68	0	51.18
Obs12	12	8.5	2.34	45	0	1.68	0	72.61
Obs13	13	8.5	1.5	19.77	0	0	-1.68	47.42
Obs14	14	8.5	1.5	70.23	0	0	1.68	86.39
Obs15	15	8.5	1.5	45	0	0	0	56.40
Obs16	16	8.5	1.5	45	0	0	0	56.50
Obs17	17	8.5	1.5	45	0	0	0	56.51
Obs18	18	8.5	1.5	45	0	0	0	56.37
Obs19	19	8.5	1.5	45	0	0	0	56.56
Obs20	20	8.5	1.5	45	0	0	0	56.55

Nota. Datos de observaciones iniciales, obtenidos de *Modelo de sistema de recuperación de aguas grises por fotocatalisis solar con nanopartículas de TiO₂ para riego de cultivos* por Carbajal-Morán (2021).

El valor obtenido en la Tabla 12 se sometió a un análisis de varianza (ANOVA) que consideró tres factores (ver Tabla 13), con un nivel de significancia establecido en $\alpha=0.05$.

Tabla 13

Análisis de varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	9	5770.25	641.14	16.67	0.000
Lineal	3	5562.45	1854.15	48.21	0.000
IUV	1	3979.87	3979.87	103.48	0.000
TiO ₂	1	580.72	580.72	15.10	0.003
Tiempo	1	1001.86	1001.86	26.05	0.000
Cuadrado	3	151.01	50.34	1.31	0.325
IUV*IUV	1	6.97	6.97	0.18	0.679
TiO ₂ *TiO ₂	1	24.14	24.14	0.63	0.447
Tiempo*Tiempo	1	135.41	135.41	3.52	0.090
Interacción 2 factores	3	56.80	18.93	0.49	0.696
IUV*TiO ₂	1	8.34	8.34	0.22	0.652
IUV*Tiempo	1	13.16	13.16	0.34	0.572
TiO ₂ *Tiempo	1	35.31	35.31	0.92	0.361
Error	10	384.62	38.46		
Falta de ajuste	5	384.59	76.92	12972.29	0.000
Error puro	5	0.03	0.01		
Total	19	6154.87			

Nota. El valor $p > 0.05$, indica falta de optimización de los factores del proceso, obtenidos de *Modelo de sistema de recuperación de aguas grises por fotocátalisis solar con nanopartículas de TiO₂ para riego de cultivos* por Carbajal-Morán (2021).

El análisis de varianza (ANOVA) fue aplicado a los tres factores; considerando el modelo lineal, cuadrático e interacción entre factores. El factor "IUV" exhibe una alta variabilidad, con un valor de F de Fisher de 103.48, en comparación con los otros factores. El factor "Tiempo" de exposición muestra una variabilidad moderada, con un valor de F de Fisher de 26.05, mientras que el factor "TiO₂" registra una menor variabilidad, con un valor de F de Fisher de 15.10. Esto indica que: IUV, TiO₂ y Tiempo, son estadísticamente significativos para recuperar el agua en tratamiento. Sin embargo, los factores cuadráticos e interacción de estas tienen un valor $p > 0.05$. Esto hace evidente la necesidad de optimizar los factores

mediante la aplicación de la metodología de escalamiento ascendente profundo (Myers et al., 2016).

Los nuevos puntos de optimización se derivaron de las siguientes condiciones experimentales: se mantuvo el nivel de radiación solar (IUV) por encima de 11 sin realizar incrementos ($\Delta=0$) debido a que ya se encontraba en el extremo más alto del espectro de radiación solar. Para el factor TiO_2 , se varió en el rango de 1.5 a 2 g/L, con incrementos de $\Delta=0.1$ g/L, y para el factor Tiempo de exposición, se experimentó en un rango de 60 a 120 minutos, con incrementos de $\Delta=15$ minutos (ver Tabla 14).

Tabla 14

Valores de escalamiento con 04 puntos

	Puntos a escalar	Variables de proceso			ICA-PE (%)
		IUV	TiO ₂ (g/L)	Tiempo (min)	Y
Orig		≥ 11	1.5	60	
Δ			0.125	15	
Orig	0	≥ 11	1.5	60	75.00
Orig + Δ	1	≥ 11	1.625	75	86.33
Orig + 2 Δ	2	≥ 11	1.750	90	86.36
Orig + 3 Δ	3	≥ 11	1.875	105	72.67
Orig + 4 Δ	4	≥ 11	2.0	120	72.69

Nota. Los puntos a escalar se calcularon para $IUV \geq 11$, siendo las únicas variables influyentes el "TiO₂" y el "Tiempo", obtenidos de *Modelo de sistema de recuperación de aguas grises por fotocatalisis solar con nanopartículas de TiO₂ para riego de cultivos* por Carbajal-Morán (2021).

3.4. Consideraciones éticas

En el contexto de esta investigación experimental, se tuvieron las siguientes consideraciones éticas:

— **Integridad científica**

Los datos de los parámetros de las aguas grises fueron obtenidos con instrumentos previamente calibrados en laboratorio certificado. Así mismo para la manipulación de las aguas grises durante su tratamiento siguió la metodología ICA-PE. También, cabe manifestar que se respetó los derechos de autor y cuyas fuentes utilizadas fueron citadas adecuadamente.

— **Conflicto de intereses**

Este trabajo es original y no presenta ningún conflicto de intereses en relación al estudio.

3.5. Resultados de la investigación

Como resultado de la investigación mediante el análisis de la experimentación optimizada se tomaron los puntos 1 y 3 del proceso de escalamiento ascendente (Tabla 14), lográndose determinar los valores centrales para los factores clave. Esto implicó mantener un IUV igual o superior a 11, emplear 1.750 g/L de TiO_2 y exponer el agua durante 105 minutos. Como resultado de esta optimización, se llevaron a cabo un total de 13 experimentos diferentes, que consistieron en 5 puntos centrales y 4 puntos axiales, los valores correspondientes al Índice de Calidad del Agua (ICA) se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15

Resultado del índice de calidad de agua con 6 puntos centrales y 6 puntos axiales optimizados

Obs.	Orden de ejecución	Variables de proceso			Codificación			ICA-PE%
		IUV	TiO ₂ (g/L)	Tiempo (min)	x ₁	x ₂	x ₃	Y
Obs1	1	≥11	1.625	75.00	0	-1	-1	86.33
Obs2	2	≥11	1.875	75.00	0	1	-1	86.15
Obs3	3	≥11	1.625	105.00	0	-1	1	86.38
Obs4	4	≥11	1.875	105.00	0	1	1	72.66
Obs5	5	≥11	1.573	90.00	0	-1.414	0	86.38
Obs6	6	≥11	1.926	90.00	0	1.414	0	72.50
Obs7	7	≥11	1.750	68.78	0	0	-1.414	86.37
Obs8	8	≥11	1.750	111.21	0	0	1.414	72.78
Obs9	9	≥11	1.750	90.0	0	0	0	86.23
Obs10	10	≥11	1.750	90.0	0	0	0	86.22
Obs11	11	≥11	1.750	90.0	0	0	0	86.21
Obs12	12	≥11	1.750	90.0	0	0	0	86.23
Obs13	13	≥11	1.750	90.0	0	0	0	86.23

Nota. Datos de observaciones optimizadas obtenidos de *Modelo de sistema de recuperación de aguas grises por fotocátalisis solar con nanopartículas de TiO₂ para riego de cultivos* por Carbajal-Morán (2021).

Cuando se evaluó los factores optimizados indicados en la Tabla 16, es notorio que los componentes lineales exhiben una variabilidad limitada, lo que se refleja en valores F pequeños, de manera similar a lo que ocurre con los factores cuadráticos y sus interacciones.

Tabla 16

Análisis de varianza para las observaciones optimizadas

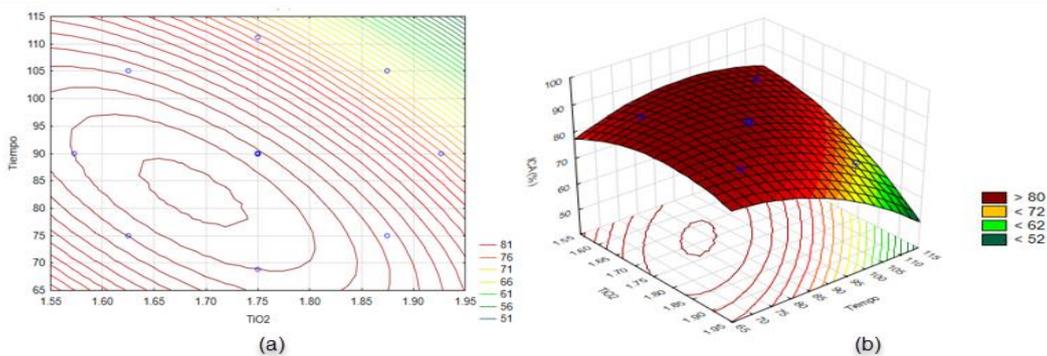
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	397.626	79.525	17.95	0.001
Lineal	2	273.901	136.950	30.90	0.000
TiO ₂	1	140.493	140.493	31.70	0.001
Tiempo	1	133.408	133.408	30.11	0.001
Cuadrado	2	77.857	38.929	8.78	0.012
TiO ₂ *TiO ₂	1	45.214	45.214	10.20	0.015
Tiempo*Tiempo	1	42.794	42.794	9.66	0.017
Interacción 2 factores	1	45.868	45.868	10.35	0.015
TiO ₂ *Tiempo	1	45.868	45.868	10.35	0.015

Nota. El valor $p < 0.05$, indica que los factores del proceso, están optimizados. Tomado de *Modelo de sistema de recuperación de aguas grises por fotocátalisis solar con nanopartículas de TiO₂ para riego de cultivos* por Carbajal-Morán (2021).

La Figura 35, ilustra el contorno y la superficie de respuesta que se obtuvieron como resultado mediante la optimización de los factores, y en esta representación gráfica se evidencia una curvatura que indica la posibilidad de encontrar agua con un índice de calidad que supere el 80%.

Figura 41

Representación del contorno con la superficie de respuesta de los factores con optimización



Nota. (a) Contorno de interacción TiO₂ y Tiempo, (b) superficie de respuesta. *Modelo de sistema de recuperación de aguas grises por fotocátalisis solar con nanopartículas de TiO₂ para riego de cultivos* por Carbajal-Morán (2021).

- ✓ Análisis de los resultados para la radiación UV solar: La radiación UV desempeña un papel de importancia en el proceso fotocatalítico para recuperar aguas grises. Cuanto mayor es la radiación UV, más rápida es la fotorreacción, lo que se refleja en los resultados del experimento. Esto se demuestra en el valor máximo alcanzado en el punto 10 de la Tabla 12, donde se encuentra agua de ICA-PE = 86.34%, manteniendo los otros factores en sus niveles intermedios ($x_2 = 0, x_3 = 0$). Mientras que, en el análisis con optimización, se considera que el valor del factor IUUV se encuentra en un nivel ≥ 11 , lo cual se logra desde aproximadamente las 10 de la mañana hasta alrededor de las 2 de la tarde.
- ✓ Análisis de resultados de la cantidad de TiO_2 : La disminución efectiva de elementos contaminantes de las aguas grises, se inició con la exploración de diferentes cantidades de TiO_2 que variaron de 0.6591 g/L a 2.34 g/L, destacaron como resultado el valor de la observación 8 (Obs8) presentado en Tabla 12. En este experimento, se logró obtener agua con un ICA-PE 86.35% al utilizar 2.0 g/L, junto con un IUUV solar de 13 durante de 60 min. Así mismo, al optimizar, con el cambio de la cantidad de TiO_2 en el rango 1.573 g/L – 1.96 g/L, se mejoraron las respuestas relacionadas con los componentes lineales, cuadráticos e interacciones, los que se detallaron en la Tabla 16.
- ✓ Análisis del tiempo de exposición: El tiempo durante el cual el agua se expuso al fotocatalizador solar en el tratamiento inicial varió en un rango de 19.77 hasta 70.23 min. Se obtuvo el mejor resultado en “Obs14” de la Tabla 12, en el cual se utilizó un IUUV solar de 8.5 y 1.5 g/L de TiO_2 . De los últimos resultados se puede concluir que la recuperación efectiva de las aguas que se trataron se logra en un intervalo de tiempo que va desde 75 a 90 minutos.
- ✓ Análisis del modelo matemático obtenido: Este modelo matemático posibilita la determinación del ICA-PE en función de la cantidad de TiO_2 y el tiempo de duración del proceso (ver ecuación 44).

$$\begin{aligned} \text{ICA} - \text{PE} (\%) = & -704 + 700x\text{TiO}_2 + 4.87x \text{Tiempo} \\ & - 163.2x (\text{TiO}_2)^2 - 0.01102x(\text{Tiempo})^2 \\ & - 1.806x\text{TiO}_2x\text{Tiempo} \end{aligned} \quad (44)$$

Esta ecuación matemática de segundo grado posibilita el cálculo de la eficacia del sistema implementado para recuperar aguas grises mediante fotocátalisis solar, específicamente para situaciones en las cuales el IUV solar es igual o mayor a 11 y siendo factores claves la cantidad de TiO_2 como el Tiempo.

3.6. Discusión de resultados de investigación

La discusión de resultados de esta investigación implica el análisis sobre los hallazgos en el estudio con respecto a los de otros autores; relacionados al índice de radiación UV solar, cantidad del TiO_2 , el tiempo de exposición y el modelo matemático que representa al sistema y la eficacia del sistema fotocatalítico.

De la radiación UV solar: La radiación UV proveniente del Sol, desempeña un papel fundamental en los procesos fotocatalíticos, como han señalado diversos estudios previos (Deza Martí et al., 2017; Miranda, 2015; Rubiano et al., 2005) y el estudio de Cabezas et al. (2016), quienes emplearon un PLC conectando las señales del proceso (DBO, DQO, pH, conductividad, turbidez, entre otros) para el control automático se enfatiza en el uso de la radiación solar. El ángulo de elevación del fotorreactor fue optimizado para captar la mayor radiación solar posible; orientando al norte con una elevación de 11° , calculado a partir del trabajo de Nfaoui y El-Hami (2018). Siendo el sensor de la radiación ultravioleta UVM-30A (Naylamp-mechatronics, 2018).

Los resultados referentes a esta radiación, establecen que un IUV solar extremadamente alto (mayor a 11) permite llevar a cabo de manera efectiva la oxidación-reducción de compuestos contaminantes de las aguas tratadas tal como establece en el estudio de Robert y Malato (2002). Esto se debe, en parte, a que la radiación UV del tipo UVA, proveniente del Sol que incide sobre la tierra, tiene una λ entre 320 y 400 nm (Curcó et al., 1996; Madronich, 2007, p. 1538) y al ser concentrada en mayor medida, por el arreglo del CPC de alta eficiencia (Otálvaro et al., 2017), irradiando a través del tubo transparente del fotorreactor

que contiene aguas grises en tratamiento, promueve la reacción en el TiO_2 , tal como estable Almomani et al. (2018), en el estudio sobre la oxidación fotocatalítica solar en la eliminación de productos farmacéuticos emergentes en las aguas residuales.

Otro aspecto ventajoso es la ubicación geográfica, donde se llevaron a cabo los experimentos, en la zona central del país, donde el IUV supera 10 durante las estaciones con menor radiación solar y aumenta a más de 20 durante las estaciones con mayor radiación, debido a la cercanía de la Tierra al Sol (Zaratti et al., 2014). Esto convierte a la energía proveniente del Sol en un recurso sostenible y beneficioso para el proceso fotocatalítico en la recuperación de aguas grises.

De la cantidad de TiO_2 : De acuerdo a los resultados obtenidos, utilizando 1.573 g/L de TiO_2 , un IUV solar ≥ 11 , expuesto por 90 min, se logró obtener agua con un ICA-PE de 86.38 %. El TiO_2 debe estar en constante movimiento, ya que este semiconductor, al ser expuesto a la luz solar, desencadena procesos de fotocátalisis debido a la radiación UV en rangos de λ de 280 a 400 nm. Durante este proceso, el agua se comporta como donante y aceptor de electrones, conduciendo a la oxidación-reducción de contaminantes, tal como se describe en estudios realizados por Fernández (2003). Así mismo, Jiménez (2015), exploró estrategias que se basa en procesos fotocatalítico para regenerar agua con cierto grado de contaminación; durante la evaluación de la actividad de fotocátalisis del TiO_2 en vidrios tubulares a escala de laboratorio, las conclusiones revelaron que este proceso demostró ser eficaz hasta el ciclo de tratamiento número 5. No obstante, se identificó como un problema la falta de movimiento del TiO_2 . En este contexto, la investigación abordó y superó esta dificultad al permitir el desplazamiento controlado del dióxido de titanio a través del controlador del proceso de fotocátalisis.

En el estudio de fotocátalisis con energía solar (Borges et al., 2016), se concluyó que el proceso de fotocátalisis es una opción sostenible, ya que logra la degradación de más del 95% de las aguas contaminadas luego de 120 min de

tratamiento, gracias a su alta capacidad oxidativa. Por último, Powell et al. (2007), llevaron a cabo una investigación que concluyó que tanto la desinfección por la energía del Sol (SODIS) como la desinfección híbrida por fotocátalisis (FHS) resultan eficaces en la eliminación de bacterias hasta alcanzar niveles aceptables. Su estudio reveló que 240 min de exposición al Sol durante la primavera, el verano y el otoño eran suficientes para lograr la desinfección. Además, la variación del pH, CE, OD y concentración bacteriana no influyeron de manera significativa en el proceso, lo que llevó a la necesidad de aplicar un tratamiento combinado con TiO_2 en su investigación.

Del tiempo de exposición: La duración de la exposición de aguas grises a los rayos del Sol es otro componente crítico para descontaminar. Los resultados de la optimización indican que un tiempo de 90 min, es efectivo cuando se combina con un IUV solar ≥ 11 y 1.573 g/L de TiO_2 . Esta combinación permitió obtener un ICA-PE de 86.38 %. Es fundamental considerar que la altura del Sol y el ángulo horario son factores esenciales que guardan una relación directa con el tiempo de exposición, el cual está vinculado a su vez con la radiación solar. La intensidad de la radiación solar varía a lo largo del día, alcanzando su punto máximo aproximadamente al mediodía solar, según lo establecido por Iqbal (1983).

El periodo de exposición es parecido a lo que se describe en el tratamiento de agua municipal contaminada (Barwal & Chaudhary, 2016). En ese estudio, se exponía el agua a la radiación solar de 5 a 6 horas, sin la utilización de semiconductores oxidativos. Por otro lado, en la investigación de Borges et al. (2016), el proceso fotocatalítico con TiO_2 se llevaba a cabo con una exposición a la radiación solar de 2 horas, lo que degradó al 95% del agua con contaminante debido a la capacidad de oxidación del TiO_2 .

Del modelo matemático: La expresión matemática proporciona una representación del proceso que permite recuperar de aguas grises y, a partir de la fórmula, se obtuvo el Índice de Calidad del Agua (ICA-PE%) como variable de respuesta (y). Durante la evaluación de los diferentes modelos, se consideraron el modelo lineal, el lineal-cuadrático y cuadrático-completo. Entre estos, se

determinó que el modelo matemático tiene el coeficiente de determinación más alto ($R^2 = 92.76$) para un nivel de significancia de $\alpha=0.05$.

De la eficacia en la recuperación de aguas grises: Los resultados de esta investigación demuestran de manera concluyente que la implementación de un sistema de fotocátalisis solar, controlado por un PLC S7-1500, es altamente eficaz en la recuperación de aguas grises aptas para uso en la agricultura, habiéndose obtenido agua con un índice de calidad de 86.38 %, encontrado considerando el rango de parámetros del agua: Conductividad eléctrica $\leq 2500 \mu\text{S}/\text{cm}$, Oxígeno disuelto $\geq 4 \text{ mg}/\text{L}$, Potencial de hidrógeno 6.5 – 8.5, Potencial óxido-reducción $\geq 500 \text{ mV}$, Turbiedad $\leq 35 \text{ UNT}$ y Cloro residual libre $< 1 \text{ mg}/\text{L}$; los mismos que se establecieron en diversos análisis (MINAM, 2017b; Victorin et al., 1972; Akiça, 2004; FAO, 1999). La eficacia de este proceso se debe a la capacidad del fotocatalizador solar, controlado por PLC S7 1500, para eliminar contaminantes presentes en el agua gris obteniéndose un recurso apto para la utilización en el riego agrícola.

De la novedad de la investigación en relación a los antecedentes: A diferencia de los otros estudios, el proceso de fotocátalisis se llevó a cabo en el departamento de Huancavelica a 3,281 msnm, el mismo que contó con una alta radiación UV solar durante días soleados y que el agua gris en tratamiento fue movilizaba constantemente mediante un sistema de bombeo recirculante controlado con PLC S7 1500, lo que uniformizó el proceso permitiendo la optimización.

Así mismo, la interface HMI y el tablero de control desarrollado en WinCC es uno de los aportes originales de esta investigación; con lo que se obtuvo una herramienta para el monitoreo en tiempo real del proceso de recuperación de aguas grises. Desde el tablero de control digital se comandaron los procesos de mezclado de aguas grises con TiO_2 y la activación/desactivación del fotorreactor, así como la programación de la duración del proceso de fotocátalisis.

Otro de los aportes que se diferencia de los estudios de los antecedentes fue el empleo de sensores con transmisores de 4 hilos de señales de corriente (4 a 20 mA) del tipo industrial sumergible con protección IP60 con medición de los

parámetros (CE, OD, pH, ORP, Turbiedad y FCL) en tiempo real; con lo que fue posible monitorear el progreso de la recuperación de aguas grises. Cabe destacar que la fotocatalisis solar reduce drásticamente la demanda de energía eléctrica convencional, lo que conlleva a menores costos operativos y una menor contribución a la emisión de gases de efecto invernadero.

Otro aporte es que este estudio estuvo enfocado en recuperar las aguas grises exclusivamente para el riego agrícola enmarcado en las normas del objetivo de desarrollo sostenible 6 y en específico del subobjetivo ODS 6.1. Así mismo se enmarcó en el ECA-Agua para controlar los parámetros del agua dentro de los rangos establecidos para el riego de vegetales sin restricción.

De la debilidad de la investigación: En la investigación se trabajó con el análisis de sólo 06 parámetros (CE, OD, pH, ORP, Turbiedad y FCL) siendo esta una limitante en cuanto al conocimiento del comportamiento de los otros parámetros físicos-químicos y bacteriológicos del agua.

El trabajo estuvo limitado al uso de la tecnología de control basado en el PLC S7 1500 con el monitoreo de los parámetros del agua por medio de la interface HMI desarrollado en WinCC, dentro de una red Profinet local, faltando mejorar la gestión del sistema de recuperación de aguas grises.

El proceso fotocatalítico al ser dependiente solo de la radiación solar, su operación está limitado a días soleados; por lo que, durante las noches, como en los días de poca o nula radiación solar, a falta de la radiación UV no se estaría llevando a cabo el proceso fotocatalítico de manera adecuada.

De las recomendaciones para futuras investigaciones: Para ampliar el alcance de la investigación referido a la recuperación de aguas grises; se recomienda realizar estudios detallados para determinar la combinación óptima de catalizadores y condiciones de irradiación solar en diferentes regiones del Perú; de modo que se conozca la eficiencia del proceso fotocatalítico en diferentes situaciones climáticas. Así mismo, deben considerarse la mayor cantidad posible de parámetros físicos-químicos y bacteriológicos del agua de acuerdo a las

normas nacionales e internacionales establecidas para recuperar agua y aplicar al riego de diferentes cultivos.

Por otro lado, queda pendiente explorar la posibilidad de la integración a las tecnologías emergentes como la inteligencia artificial, para mejorar la eficiencia del control de procesos y optimizar la gestión del sistema de recuperación de aguas grises.

También, es necesario investigar la posibilidad de desarrollar sistemas híbridos, que combinen el uso de la radiación UV solar y radiación UV provenientes de fuentes convencionales para operar de manera continua durante las noches como en días nublados; así mismo es necesario usar membranas de ultrafiltración, para mejorar aún más la calidad del agua recuperada; para esto, se debe realizar experimentos para validar la viabilidad y eficiencia del sistema en condiciones más cercanas a la aplicación práctica, identificando posibles desafíos y oportunidades de mejora.

Los resultados pueden servir como punto de partida para futuras investigaciones que busquen avanzar en la innovación y eficiencia de la fotocátalisis solar en la recuperación de aguas grises para la agricultura, aprovechando las capacidades del PLC S7-1500.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y REFLEXIONES

4.1. Conclusiones

En esta investigación, de los análisis realizados a partir de los ensayos iniciales, se puede concluir que un IUV ≥ 11 , conjugado con los otros factores, tiene un impacto positivo produciendo una efectiva recuperación de las aguas grises destinadas al riego agrícola.

En cuanto a las dosis de TiO_2 , se experimentaron de 1 a 2 g/L en busca de la calidad optimizada del agua; al realizar el análisis ANOVA, se encontró que las cantidades ideales de este compuesto estaban de 1.625 a 1.875 g/L, lo cual permitió obtener agua de buena calidad.

La investigación también abordó el tiempo de exposición al Sol del fotocatalizador, concluyéndose que un período de exposición que varía entre 75 y 105 min permitió obtener agua con ICA-PE superior a 86%. Esto significa que el agua obtenida alcanza un nivel de calidad adecuado empleable en riego agrícola.

El modelo matemático cuadrático completo se destacó como el más efectivo para recuperación de aguas grises mediante la fotocatalisis solar, con un alto coeficiente de determinación ($R^2 = 92.76$) para un $\alpha=0.05$.

Finalmente, los resultados indican que los factores involucrados para recuperar aguas grises tienen interacciones entre sí, y que se pueden obtener agua con ICA-PE superiores a 86% que está directamente relacionado con la eficacia del fotocatalizador solar, controlado por PLC S7 1500: empleando IUV solar ≥ 11 , TiO_2 de menos de 2 g/L y con un tiempo menos de 120 min en el fotocatalizador implementado, manteniendo el agua en movimiento para que no se sedimente.

4.2. Recomendaciones

Debido al alcance del trabajo para la recuperación de aguas grises mediante procesos fotocatalíticos controlados por el PLC S7-1500 se recomienda tomar diferentes acciones que mejoren la calidad del agua; para esto, basados en los resultados de la investigación, se recomienda optimizar el sistema de control con el PLC S7-1500 para garantizar la eficiencia en los procesos fotocatalíticos

empleando sensores industriales para la medición de los parámetros del agua. Esto implica ajustar las variables y parámetros del control de manera regular para adaptarse a las condiciones cambiantes de acuerdo a la calidad de las aguas grises en tratamiento. Así mismo, considerar capacidades de monitoreo y control remoto para el sistema a través de conexiones de red seguras. Esto permitirá supervisar y realizar ajustes incluso cuando no esté presente en el lugar.

Se debe implementar un plan de mantenimiento para prevenir daños en el sistema de control con PLC S7 1500. Esto incluye la inspección regular de hardware, software y componentes eléctricos para garantizar un funcionamiento óptimo. También, se debe asegurar de que el sistema de control y los procesos fotocatalíticos cumplan con todas las regulaciones y normativas ambientales y de seguridad. Esto es fundamental para garantizar un funcionamiento dentro del marco legal y sostenible.

Mostrar un compromiso sólido con la responsabilidad ambiental. Utilizar el sistema de control para minimizar el desperdicio de recursos y reducir al máximo el impacto ambiental de la recuperación de aguas grises. Así mismo se debe fomentar la colaboración entre expertos en control con PLC y profesionales en fotocatalisis, así como con investigadores y autoridades en el campo ambiental; puesto que la sinergia entre disciplinas puede llevar a soluciones más efectivas.

Estas recomendaciones pueden servir como guía para asegurar que la recuperación de aguas grises mediante procesos fotocatalíticos controlados por el PLC S7-1500 sea eficiente, sostenible y cumpla con los estándares de calidad y seguridad requeridos.

4.3. Reflexiones

La investigación sobre "Fotocatálisis Solar en la Recuperación de Aguas Grises para Agricultura: Innovación y Eficiencia por Control de Procesos con PLC S7-1500" nos lleva a reflexionar sobre la necesidad de soluciones sostenibles, debido a la creciente demanda del agua en la agricultura es un desafío global, esta investigación valora la importancia de encontrar soluciones sostenibles para la

gestión de recursos hídricos, especialmente en regiones propensas a la escasez de agua como la región central del Perú.

Es necesario generar tecnología con innovación aplicado al aprovechamiento de recursos provenientes de la radiación solar junto con la tecnología de automatización eficiente a través de PLC robustos como el S7-1500; presentando una innovación significativa en la recuperación de aguas grises. Este tipo de tecnología es prometedora y ofrece una alternativa eficiente y ecológica.

En todo proceso se debe buscar el impacto ambiental positivo, integrando la energía solar para alimentar el proceso con radiación UV no solo hace que la operación sea eficiente, sino que también reduce la huella de carbono; destacándose como una tecnología limpia que aporta a la gestión de los recursos naturales. La calidad del agua tratada y los resultados de análisis respaldan su uso en la agricultura. Esto plantea la posibilidad de aplicar esta tecnología en diferentes entornos y condiciones, lo que puede contribuir a la seguridad alimentaria y la reducción del estrés hídrico.

A pesar de los resultados alentadores, es fundamental reconocer que existen desafíos y limitaciones en la implementación a gran escala para diferentes lugares por la geografía variada; por lo que, se requiere un enfoque continuo en la investigación y desarrollo para abordar estos desafíos y optimizar el proceso.

La investigación deja la impresión de que la innovación y la tecnología pueden desempeñar un papel importante en la resolución de problemas ambientales y en la mejora de la eficiencia de los recursos. Sin embargo, también resalta la necesidad de seguir investigando y perfeccionando estas soluciones para hacer frente a los desafíos globales relacionados con el agua y la agricultura.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akiça, V. L. (2004). *Water Reuse for Water Reuse for Irrigation, Agriculture, Landscapes, and Turf Grass*. En *New York*. CRC Press.
<https://cutt.ly/zwRSYbMf>
- Albalawneh, A., Chang, T.-K., & Alshawabkeh, H. (2017). Greywater treatment by granular filtration system using volcanic tuff and gravel media. *Water Science and Technology*, 75(10), 2331-2341.
<https://doi.org/10.2166/wst.2017.102>
- Almomani, F., Bhosale, R., Kumar, A., & Khraisheh, M. (2018). Potential use of solar photocatalytic oxidation in removing emerging pharmaceuticals from wastewater: A pilot plant study. *Solar Energy*.
<https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2018.07.041>
- Bahrami, M., Amiri, M. J., & Badkubi, M. (2020). Application of horizontal series filtration in greywater treatment: a semi-industrial study. *Australasian Journal of Water Resources*, 24(2), 236-247.
<https://doi.org/10.1080/13241583.2020.1824610>
- Bairagi, V., & Munot, M. V. (2019). *Research methodology: A practical and scientific approach* (1.ª ed.). CRC Press/Taylor & Francis Group.
- Barwal, A., & Chaudhary, R. (2016). Feasibility study for the treatment of municipal wastewater by using a hybrid bio-solar process. *Journal of Environmental Management*, 177, 271-277.
<https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2016.04.022>
- Berger, H. (2017). *Automating with SIMATIC S7-1500: Configuring, Programming and Testing with STEP 7 Professional* (2.ª ed.). Publicis.
- Bollaín Sánchez, M. (2019). *Ingeniería de instrumentación de plantas de proceso*. Ediciones Díaz de Santos.
<https://dct.digitalcontent.com.co/sview/default.aspx>

- Borges, M. E., Sierra, M., Cuevas, E., García, R. D., & Esparza, P. (2016). Photocatalysis with solar energy: Sunlight-responsive photocatalyst based on TiO₂ loaded on a natural material for wastewater treatment. *Solar Energy*, 135, 527-535. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2016.06.022>
- Boyjoo, Y., Pareek, V. K., & Ang, M. (2013). A review of greywater characteristics and treatment processes. *Water Science and Technology*, 67(7), 1403-1424. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.675>
- Boylestad, R. L., & Nashelsky, L. (2003). *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. Pearson Educación.
- Cabezas, P. T., Gómez, P. M., Jiménez, J. A., García-Nieto, I. C., Rogel, M. S., & Cortijo, T. P. (2016). Proyecto Life WaterReuse: Gestión eficiente del agua en industrias con elevada carga orgánica. *Tecnoaqua*, 22, 30-40. <https://cutt.ly/ZwRSTaID>
- Carbajal-Morán, H. (2021). *Modelo de sistema de recuperación de aguas grises por fotocatalisis solar con nanopartículas de TiO₂ para riego de cultivos* [Tesis doctoral, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/7008>
- Carbajo, J. (2013). *Aplicación de la fotocatalisis solar a la degradación de contaminantes orgánicos en fase acuosa con catalizadores nanoestructurados de TiO₂*. [Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Madrid]. Repositorio Institucional UAM. <http://hdl.handle.net/10486/14229>
- Carrasco, S. (2019). *Metodología de la investigación científica. Pautas metodológicas para diseñar y elaborar el proyecto de investigación* (19.^a ed.). Editorial San Marcos EIR Ltda.
- Centeno Pomareta, P. (2017). *Introducción a TIA Portal con S7-1500*. [Proyecto de fin de grado, Universidad Politécnica de Madrid] <https://oa.upm.es/49911/>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2015). *Agenda 2030 para el*

Desarrollo Sostenible. <https://agenda2030lac.org/es/ods/6-agua-limpia-y-saneamiento/metas/63>

Chiron, A., & Cachorro, V. E. (2008). *La radiación solar en el sistema tierra-atmósfera*. Ediciones Universidad de Valladolid.

Christova-Boal, D., Eden, R. E., & McFarlane, S. (1996). An investigation into greywater reuse for urban residential properties. *Desalination*, 106(1-3), 391-397. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(96\)00134-8](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(96)00134-8)

Colina, J. A., & Castilla, D. R. (2013). Mineralización fotocatalítica de agua residual contaminada con dicloxacilina comercial en un reactor solar CPC a escala piloto. *Ingeniería y Competitividad*, 15(1), 161-169. <http://www.scielo.org.co/pdf/inco/v15n1/v15n1a15.pdf>

Corona Ledesma, A. E. (2022). *Desarrollo de un sistema multipantalla SCADA para la automatización de células de fabricación* [Universidad de La Laguna]. <https://acortar.link/zXOX10>

Curcó, D., Malato, S., Blanco, J., & Giménez, J. (1996). Photocatalysis and radiation absorption in a solar plant. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 44(2), 199-217. [https://doi.org/10.1016/0927-0248\(96\)00059-1](https://doi.org/10.1016/0927-0248(96)00059-1)

Daneri, P. A. (2009). *PLC: automatización y control industrial*. Hispano Americana HASA. <https://elibro.net/es/lc/bibliounh/titulos/66558>

Deza Martí, E., Osorio Anaya, A., & Manrique Fajardo, J. J. (2017). Evaluación experimental de la degradación fotocatalítica del colorante Cibacron Navy H-2G empleando nanopartículas industriales de TiO₂. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 83(2), 160-173. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v83i2.193>

Drucker, P. F. (2020). *The essential drucker*. Routledge. <https://acortar.link/kf6rCP>

ECyT-ar. (24 de noviembre de 2017). *Irradiación solar*. <https://cutt.ly/wwU8t1BQ>

Eriksson, E., Andersen, H. R., Madsen, T. S., & Ledin, A. (2009). Greywater

- pollution variability and loadings. *Ecological engineering*, 35(5), 661-669.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.10.015>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (1999). *Wastewater treatment and use in agriculture*.
<http://www.fao.org/3/T0551E/T0551E00.htm>
- Fernández, P. (2003). *Propiedades coloidales de partículas de TiO₂: Aplicación al tratamiento fotocatalítico solar de aguas*. [Tesis doctoral, Universidad de Granada]. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=145121>
- GmbH & Co. (2022). *Grafcet-Studio*. <https://cutt.ly/bwRDnbey>
- Goddard, N. (2022). *Equinoccio: qué es y cómo ver el fenómeno que marca el cambio de estación*. National Geographic. <https://acortar.link/KUySoU>
- Gross, A., Shmueli, O., Ronen, Z., & Raveh, E. (2007). Recycled vertical flow constructed wetland (RVFCW) – a novel method of recycling greywater for irrigation in small communities and households. *Chemosphere*, 66(5), 916-923.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.06.006>
- Guerrero Saiz, J. (2019). *Programación estructurada de autómatas programables con Grafcet*. Ediciones Paraninfo, SA.
- Häggglund, T., & Bauer, M. (2023). *Process Control in Practice*. De Gruyter.
<https://doi.org/10.1515/97831111104959>
- Hammer, M., & Champy, J. (1993). *Reengineering the corporation: Manifesto for business revolution*. *Business Horizons*, 36 (5), 90-91.
[https://doi.org/10.1016/S0007-6813\(05\)80064-3](https://doi.org/10.1016/S0007-6813(05)80064-3)
- Hashimoto, K., Irei, H., & Fijishima, A. (2005). TiO₂ Photocatalysis : A Historical Overview and Future Prospects. *Japanese Journal of Applied Physics*, 44(12).
<https://doi.org/10.1143/JJAP.44.8269>
- Hernández, R., & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación - Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill.

- Herrmann, J. M., Matos, J., Disdier, J., Guillard, C., Laine, J., Malato, S., & Blanco, J. (1999). Solar photocatalytic degradation of 4-chlorophenol using the synergistic effect between titania and activated carbon in aqueous suspension. *Catalysis Today*, 54(2-3), 255-265. [https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(99\)00187-X](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(99)00187-X)
- Imhof, B., & Mühlemann, J. (2005). Grey water treatment on household level in developing countries a state of the art review. *Eidgenössische Technische Hochschule Zurich*, 98. <https://cutt.ly/EwRSDqlo>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2022). *Perú: Anuario de Estadísticas Ambientales 2022*. <https://cutt.ly/VwRSDH71>
- Iqbal, M. (1983). An introduction to solar radiation. En *ScienceDirect*. Academic Press. <https://cutt.ly/twRSGUMF>
- Ishikawa, K. (2003). *¿Qué es el control total de calidad?* Editorial Norma. <https://acortar.link/LY8Ys7>
- Javadinejad, S., Dara, R., Hamed, M. H., Saeed, M. A. H., & Jafary, F. (2020). Analysis of gray water recycling by reuse of industrial waste water for agricultural and irrigation purposes. *Journal of Geographical Research*, 3(2), 20-24. <https://doi.org/10.30564/jgr.v3i2.2056>
- Jiang, D., Zhao, H., Zhang, S., & John, R. (2003). *Characterization of photoelectrocatalytic processes at nanoporous TiO₂ film electrodes : photocatalytic oxidation of glucose*. 107(43), 12774-12780. <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/jp0307349>
- Jiménez, M. (2015). *Desarrollo de nuevas estrategias basadas en fotocatálisis solar para la regeneración de aguas de una industria agro-alimentaria*. [Tesis doctoral, Universidad de Almería]. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=222156>
- Khanam, K., & Patidar, S. K. (2022). Greywater characteristics in developed and developing countries. *Materials Today: Proceedings*, 57, 1494-1499.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.022>

Kim, R.-H., Lee, S., Jeong, J., Lee, J.-H., & Kim, Y.-K. (2007). Reuse of greywater and rainwater using fiber filter media and metal membrane. *Desalination*, 202(1), 326-332.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.12.071>

Kreider, J. F. (1979). Medium temperature solar collectors and ancillary components. En *Medium and high temperature solar processes* (pp. 100-160). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-425980-5.50009-1>

Leal, L. H., Temmink, H., Zeeman, G., & Buisman, C. J. N. (2011). Characterization and anaerobic biodegradability of grey water. *Desalination*, 270(1-3), 111-115. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.11.029>

Leckner, B. (1978). The spectral distribution of solar radiation at the earth's surface-elements of a model. *Solar Energy*, 20(2), 143-150. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(78\)90187-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(78)90187-1)

Livanov, D. (2023). *The Physics of Planet Earth and Its Natural Wonders*. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-33426-9>

Madronich, S. (2007). Analytic formula for the clear-sky UV index. *Photochemistry and Photobiology*, 83(6), 1537-1538. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2007.00200.x>

Melo, O. O., López, L. A., & Melo, S. E. (2020). *Diseño de experimentos: Métodos y aplicaciones* (2.^a ed.). Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/79912>

Mendoza, E. (2013). Elementos de astronomía observacional: la esfera celeste. *Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica*. <https://cutt.ly/jwRSEpa9>

Məmmədli, M., & Kəbaoğlu, R. O. (2021). Simultaneous Monitoring and Control of Automation Systems with SCADA Based PLC. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(1), 336-344. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.899424>

- Ministerio del Ambiente. (2017a). *Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM*.
<https://cutt.ly/nwRSZBFf>
- Ministerio del Ambiente. (2017b). Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua. *El Peruano*, 19. <https://cutt.ly/awRSCsPy>
- Miranda, N. (2015). *Degradación de contaminantes emergentes mediante TiO2 inmovilizado e irradiación solar*. [Tesis doctoral, Universidad de Almería]. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=111620>
- Morel, A., & Diener, S. (2006). *Greywater management in low and middle -income countries: review of different treatment systems for households or neighbourhoods*. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag). <https://cutt.ly/BwRSM9Tb>
- Moyares, Y., & Lorenzo, D. B. (2021). La Arquitectura de Información (AI) en el proceso de desarrollo de software. *Bibliotecas. Anales de investigación*, 6, 97-102. <https://core.ac.uk/download/pdf/230403505.pdf>
- Muñoz Flores, P. (2022). *Evaluación de la factibilidad técnica de la fotocátalisis heterogénea en el tratamiento de aguas residuales de la industria alimentaria*. [Tesis doctoral, Universidad de Concepción]. Repositorio institucional de la Universidad de Concepción. <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/9671>
- Murcia, M. L., Calderón, O. G., & Díaz, J. E. (2014). Impacto de aguas grises en propiedades físicas del suelo. *TecnoLógicas*, 17(32), 57. <https://doi.org/10.22430/22565337.204>
- Myers, R., Montgomery, D., & Anderson-Cook, C. (2016). *Response surface methodology, process and product optimization using designed experiments* (4.^a ed.). Wiley. <https://acortar.link/UEwYty>
- Nahim, S., Sánchez, J. A., & Polo, M. I. (2018). Effective solar processes in fresh-cut wastewater disinfection: Inactivation of pathogenic E. coli O157:H7 and Salmonella enteritidis. En S. Malato, J. Krýsa, P. Pichat & D. Mantzavinos

- (Eds.), *Catalysis Today* (pp. 79-85). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/J.CATTOD.2017.10.042>
- Naylamp-mechatronics. (2018). *Módulo Sensor de luz ultravioleta (UV) UVM-30A*.
<https://acortar.link/KBsy4m>
- Nfaoui, M., & El-Hami, K. (2018). Extracting the maximum energy from solar panels. *Energy Reports*, 4, 536-545.
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2018.05.002>
- Nolde, E. (2000). Greywater reuse systems for toilet flushing in multi-storey buildings—over ten years experience in Berlin. *Urban water*, 1(4), 275-284.
[https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00023-6](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00023-6)
- Otálvaro, H. L., Mueses, M. A., Crittenden, J. C., & Machuca, F. (2017). Solar photoreactor design by the photon path length and optimization of the radiant field in a TiO₂-based CPC reactor. *Chemical Engineering Journal*, 315, 283-295. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.01.019>
- Otterpohl, R., Grottker, M., & Lange, J. (1997). Sustainable water and waste management in urban areas. *Water Science and Technology*, 35(9), 121-133.
<https://doi.org/10.2166/wst.1997.0336>
- Peciña, L. (2018). *Programación de Controladores avanzados SIMATIC S7 1500 con TIA Portal AWL y SCL* (2.^a ed.). Marcombo.
- Pérez, V. (2019). *El movimiento de rotación de la Tierra y los husos horarios*. Hidden Nature. <https://acortar.link/9G2Pf6>
- Pirraglia, G. (2018). *Programmazione avanzata con PLC S7-1200/1500, HMI, I/O analogici e orologio HW*. HOPEPLI. <https://acortar.link/zxxZNK>
- Powell, P. A., Litter, M., Blesa, M. A., & Apella, M. C. (2007). Desinfección solar de aguas por fotólisis y fotocátalisis: aplicación en Tucuman, Argentina. *Medioambiente en Iberoamérica*, 2, 1-6.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7397894>

- Prajapati, B., Jensen, M. B., Jørgensen, N. O. G., & Petersen, N. B. (2019). Grey water treatment in stacked multi-layer reactors with passive aeration and particle trapping. *Water research*, 161, 181-190. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.096>
- Rata, M., Rata, G., Graur, A., & Bejenar, C. (2021). Automation design of a two-axis control using sinamics s210 and s7-1511t PLC. *2021 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN)*, 498-502. <https://doi.org/10.1109/SIELMEN53755.2021.9600319>
- Riordan, C. J., Hulstrom, R. L., & Myers, D. R. (1990). *Influences of atmospheric conditions and air mass on the ratio of ultraviolet to total solar radiation*. Solar Energy Research Institute. <https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/3895.pdf>
- Robert, D., & Malato, S. (2002). Solar photocatalysis: a clean process for water detoxification. *Science of the total environment*, 291(1-3), 85-97. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)01094-4](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)01094-4)
- Rubiano, C. M., Laguna, W. A., Zapata, C. E., & Marín, J. M. (2005). Estudio sobre las posibilidades de aplicación de la fotocatalisis heterogénea a los procesos de remoción de fenoles en medio acuoso. *Gestión y Ambiente*, 8 (1), 105-121. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169421171002>
- Samayamanthula, D. R., Sabarathinam, C., & Bhandary, H. (2019). Treatment and effective utilization of greywater. *Applied Water Science*, 9(4). <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0966-0>
- Santos, C., Taveira-Pinto, F., Cheng, C. Y., & Leite, D. (2012). Development of an experimental system for greywater reuse. *Desalination*, 285, 301-305. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.10.017>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2003). *Atlas de energía solar del Perú*. <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/343>

- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2023a). *Cálculo del índice UV*. <https://www.senamhi.gob.pe/public/html/popup-ruv.htm>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2023b). *Pronóstico de radiación UV máximo (cielo despejado y mediodía solar) a nivel nacional*. <https://www.senamhi.gob.pe/?&p=radiacion-uv>
- Serpone, N., & Emeline, A. V. (2002). Suggested terms and definitions in photocatalysis and radiocatalysis. *International Journal of Photoenergy*, 4(3), 93-131. <https://doi.org/10.1155/s1110662x02000144>
- Sheng, Z., Ji, C., & Hua, S. (2018). Application of Siemens PLC and WinCC in the Monitoring-Control System of Bulk Grain Silo. En *2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC), Chinese Control And Decision Conference (CCDC), 2018* (pp. 4689-4693). <https://doi.org/10.1109/CCDC.2018.8407942>
- Siemens. (2016). *Módulos de entradas y salidas digitales DI 16x24VDC/DQ 16x24VDC/0.5A*. <https://acortar.link/ySGzgg>
- Siemens. (2018). *Módulo de entradas analógicas AI 8xU/I/RTD/TC ST*. <https://cutt.ly/3wRDehvJ>
- Siemens. (2019a). *OPC UA Server & Client*. <https://cutt.ly/fwRDrmww>
- Siemens. (2019b). *S7-1500, ET 200MP Sistema de automatización*. <https://cutt.ly/ewRDaloq>
- Siemens. (2019c). *Which browser can you use for SIMATIC WinCC Unified?* - ID: 109757952. <https://cutt.ly/awRDsUZm>
- Siemens. (2021a). *How can you use the memory card for the S7 PLC?* https://support.industry.siemens.com/cs/images/87133851/fig_1.png
- Siemens. (2021b). *Siemens TIA Portal V17 Ingeniería más eficiente con más opciones - infoPLC*. <https://cutt.ly/uwRDdbCq>
- Siemens. (2022). *SIMOTION Motion Control System*. <https://cutt.ly/YwRDfdQm>
- Siemens. (2023a). *Descarga de la versión de prueba del TIA Portal Test Suite Advanced*

V18. <https://cutt.ly/pwRDgr12>

Siemens. (2023b). *PLC Programming with SIMATIC STEP7*. <https://cutt.ly/iwRDhlcd>

Siemens AG. (2017). *Módulo TIA Portal 052-201 Programación en lenguajes de alto nivel con SCL y SIMATIC S7-1500*. <https://cutt.ly/JwRDjaTt>

Singh, V., Kaur, A., & Gupta, N. C. (2020). Comparative analysis of the filtration potential of light greywater through various media. *Malaysian Journal Of Science*, 159-172. <https://doi.org/10.22452/mjs.vol39no3.12>

Soe, Y. Y., & San, P. E. (2019). PID Closed-Loop Control Analysis for Automation with Siemens PLC Using TIA V13. *International Journal Of All Research Writings*, 2(3), 200-208. <http://www.ijciras.com/PublishedPaper/IJCIRAS1361.pdf>

Šostar-Turk, S., Petrinić, I., & Simonič, M. (2005). Laundry wastewater treatment using coagulation and membrane filtration. *Resources, Conservation and Recycling*, 44(2), 185-196. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2004.11.002>

Spencer, J. W. (1971). *Fourier series representation of the position of the sun*. <https://cutt.ly/uwRDka3Q>

SunEarthTools.com. (2023). *Posición del Sol*. https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php

Victorin, K., Hellström, K. G., & Rylander, R. (1972). Redox potential measurements for determining the disinfecting power of chlorinated water. *Journal of Hygiene*, 70(2), 313-323. <https://doi.org/10.1017/S0022172400022361>

Vidal, A., Díaz, A. I., El Hraiki, A., Romero, M., Muguruza, I., Senhaji, F., & González, J. (1999). Solar photocatalysis for detoxification and disinfection of contaminated water: Pilot plant studies. *Catalysis Today*, 54(2-3), 283-290. [https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(99\)00189-3](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(99)00189-3)

- Wiltronics. (2016). *UV Detection Sensor*. <https://cutt.ly/4wRDx6LA>
- Yu, Z. L. T., Rahardianto, A., DeShazo, J. R., Stenstrom, M. K., & Cohen, Y. (2013). Critical review: regulatory incentives and impediments for onsite graywater reuse in the United States. *Water Environment Research*, 85(7), 650-662. <https://doi.org/10.2175/106143013X13698672321580>
- Zaratti, F., Piacentini, R. D., Guillén, H. A., Cabrera, S. H., Liley, J. Ben, & McKenzie, R. L. (2014). Proposal for a modification of the UVI risk scale. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 13(7), 980-985. <https://doi.org/10.1039/c4pp00006d>
- Zehe, A., & Thomas, A. (2001). *Tecnología epitaxial de silicio*. BoD-Books on Demand. <https://cutt.ly/BwRDvWRa>

INFORMACIÓN DEL AUTOR

Hipólito Carbajal Morán



Docente investigador RENACYT. Doctor en Ciencias Ambientales y Desarrollo Sostenible, Magíster en Ingeniería de Sistemas mención: Gestión de Sistemas Empresariales, Ingeniero Electrónico. Docente de pregrado en la Universidad Nacional de Huancavelica. especialista en Control y Automatización con PLC. Desarrolla investigaciones en el área de nanotecnología con aplicaciones al medio ambiente. Ha sido investigador principal y asociado en diversos proyectos de investigación con financiamiento nacional. Director de la Unidad de Posgrado, director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería Electrónica-Sistemas de la Universidad Nacional de Huancavelica. Línea de investigación Automatización y Control. Cuenta con publicaciones en Scopus, WoS y otras bases de datos.

Este libro se terminó de publicar en la editorial

**Instituto Universitario
de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú**



ISBN: 978-612-5130-09-9

