



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA
ELÉCTRICA**

Sistema automatizado de limpieza de paneles solares con control PID
para la optimización de los recursos usados en la mitigación de polvo

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniero Mecánico Eléctricista

AUTORES:

Depaz Hilario, Ralph Edilberto (orcid.org/0000-0003-0552-8907)

Portilla Socon, Joel Albert (orcid.org/0000-0003-1095-1187)

ASESORA:

Mg. Serrepe Ranno, Miriam Marcela (orcid.org/0000-0001-9342-1717)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Generación, Transmisión y Distribución

LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:

Desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático

TRUJILLO – PERÚ

2024



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA**

Declaratoria de Autenticidad del Asesor

Yo, SERREPE RANNO MIRIAM MARCELA, docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - TRUJILLO, asesor de Tesis titulada: "Sistema automatizado de limpieza de paneles solares con control PID para la optimización de los recursos usados en la mitigación de polvo", cuyos autores son DEPAZ HILARIO RALPH EDILBERTO, PORTILLA SOCON JOEL ALBERT, constato que la investigación tiene un índice de similitud de 16%, verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones.

He revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la Tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido, asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

TRUJILLO, 19 de Julio del 2024

Apellidos y Nombres del Asesor:	Firma
SERREPE RANNO MIRIAM MARCELA DNI: 06437594 ORCID: 0000-0001-9342-1717	Firmado electrónicamente por: SRANNOMM el 31- 08-2024 14:56:34

Código documento Trilce: TRI - 0823847





**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA**

Declaratoria de Originalidad de los Autores

Nosotros, DEPAZ HILARIO RALPH EDILBERTO, PORTILLA SOCON JOEL ALBERT estudiantes de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - TRUJILLO, declaramos bajo juramento que todos los datos e información que acompañan la Tesis titulada: "Sistema automatizado de limpieza de paneles solares con control PID para la optimización de los recursos usados en la mitigación de polvo", es de nuestra autoría, por lo tanto, declaramos que la Tesis:

1. No ha sido plagiada ni total, ni parcialmente.
2. Hemos mencionado todas las fuentes empleadas, identificando correctamente toda cita textual o de paráfrasis proveniente de otras fuentes.
3. No ha sido publicada, ni presentada anteriormente para la obtención de otro grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados.

En tal sentido asumimos la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de la información aportada, por lo cual nos sometemos a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

Nombres y Apellidos	Firma
JOEL ALBERT PORTILLA SOCON DNI: 44795192 ORCID: 0000-0003-1095-1187	Firmado electrónicamente por: JPORTILLASO el 19- 07-2024 00:10:39
RALPH EDILBERTO DEPAZ HILARIO DNI: 72285836 ORCID: 0000-0003-0552-8907	Firmado electrónicamente por: RDEPAZHI el 19-07- 2024 23:57:29

Código documento Trilce: TRI - 0823845

Dedicatoria

Esta tesis está dedicada a:

A nuestras familias que siempre han estado presente en cada uno de nuestros pasos, por su incondicional apoyo para lograr nuestros éxitos, cada uno de sus consejos han sido importantes para lograr los éxitos profesionales en nuestras vidas, también a todas las personas que hicieron posible la realización de esta tesis, con su asesoría y sus consejos nos permitieron lograr terminar esta tesis satisfactoriamente.

Agradecimiento

Queremos agradecer a todas las personas involucradas en la realización de esta tesis, a nuestras familias por su apoyo incondicional en todo este tiempo de estudios con gran sacrificio que permitieron llegar a culminar con éxito mi carrera profesional, agradecer a la universidad por la enseñanza impartida en estos años, a nuestra asesora presente en cada parte del desarrollo de la tesis.

Índice de contenidos

Carátula	i
Declaratoria de Autenticidad del Asesor	ii
Declaratoria de Originalidad de los Autores	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimiento	v
Índice de contenidos	vi
Índice de tablas	vii
Índice de figuras.....	viii
Resumen.....	ix
Abstract.....	x
I. INTRODUCCIÓN	1
II. METODOLOGÍA	8
III. RESULTADOS	11
IV. DISCUSIÓN.....	32
V. CONCLUSIONES	35
VI. RECOMENDACIONES	38
REFERENCIAS	39
ANEXOS.....	43

Índice de tablas

Tabla 1. Matriz de operacionalización de las variables	25
Tabla 2. Ficha de registro influencia de factores de polvo en los paneles solares fotovoltaicos.....	28

Índice de figuras

Figura 1. Relación entre variable dependientes y la variable independiente.....	7
Figura 2. Etapas de control PID	
Figura 3. Ficha técnica del panel solar.	11
Figura 4. Panel solar con el sistema automatizado de limpieza y el control PID.....	13
Figura 5. Medición con el solarímetro.	13
Figura 6. Esquema electrónico del sistema automatizado con la implementación del control PID.	16
Figura 7. Panel solar limpio, sucio y en proceso de limpieza.	19
Figura 8. Medición de la potencia real de salida del panel luego de implementado el control PID.	19
Figura 9. Medición de la corriente y voltaje con la pinza amperimétrica y con el vatímetro respectivamente.	21
Figura 10. Rendimiento del panel solar vs tiempo.	22
Figura 11. Diagrama de flujo del proceso de detección y limpieza de suciedad.	22
Figura 12. Diagrama funcional del sistema de control PID en la limpieza de polvo.	23
Figura 13. Modelo 3D detallado del sistema de control PID de limpieza de paneles solares.....	25

Resumen

La demanda de energía eléctrica ha aumentado exponencialmente con el transcurso de los años y el avance de la tecnología, por lo cual el ser humano ha buscado diferentes fuentes energéticas que puedan cubrir la gran demanda de energía eléctrica existente. Una de las fuentes de energía que se han desarrollado con mayor fuerza, es la energía solar, sin embargo presenta algunos problemas, uno de los problemas es el polvo que reduce la captación de la energía solar, por lo cual se han desarrollado con los años los sistemas automatizados de limpieza para la mitigación del polvo, sin embargo los sistemas actuales presentan problemas que hacen deficiente la función que realizan y por ende tienen una baja optimización de los recursos que usan para el proceso de limpieza. En la presente tesis se buscó mejorar la eficiencia de los sistemas automatizados permitiendo mejorar la optimización de los recursos usados para la limpieza, con la implementación de un control PID, por lo cual se realizaron pruebas en un panel solar de la marca Shunshine de tipo monocristalino, con una potencia máxima de 60W y una eficiencia de conversión de energía solar en energía eléctrica de 19,6%, la toma de datos se realizó antes y después de la implementación. Los datos hallados confirmaron que la implementación de un control PID mejora el proceso de limpieza de un panel solar drásticamente, debido a que antes de la implementación se obtuvieron 35 W a la salida del panel solar, dicho valor representa un 11.5470% en la eficiencia de conversión de energía solar a energía eléctrica, representando una baja considerable en la eficiencia, luego se procedió a la implementación del control PID, usando una tarjeta Arduino uno, un sensor de polvo, un actuador, siendo ventiladores los usado como los encargados de la limpieza. Obteniendo 57 W a la salida del panel solar, representando una eficiencia de 18.8051%. mejorando el proceso de limpieza en más de 7% y siendo muy cercana a la eficiencia nominal del panel solar, con apenas una reducción menor al 1%. También permitiendo optimizar los recursos empleados para el proceso de limpieza, gracias a que la tarjeta Arduino y los ventiladores consumen 12V y 5V respectivamente. También se demostró que es rentable la implementación, gracias a los cálculos realizados con la fórmula de retorno de la inversión (ROI), obteniéndose 12.09% anual, siendo un valor muy bueno para la inversión realizada.

Palabras clave: Paneles solares, limpieza, mitigación del polvo.

Abstract

The demand for electricity has increased exponentially over the years and the advancement of technology, so the human being has sought different energy sources that can meet the high demand for electricity. One of the energy sources that have been developed with greater force is solar energy, however it presents some problems, one of the problems is the dust that reduces the capture of solar energy, so over the years automated cleaning systems have been developed for dust mitigation, however current systems have problems that make the function they perform deficient and therefore have a low optimization of the resources used for the cleaning process. In this thesis, we sought to improve the efficiency of the automated systems allowing to improve the optimization of the resources used for cleaning, with the implementation of a PID control, for which tests were performed on a Shunshine monocrystalline solar panel, with a maximum power of 60W and an efficiency of conversion of solar energy into electrical energy of 19.6%, the data collection was performed before and after the implementation. The data found confirmed that the implementation of a PID control improves the cleaning process of a solar panel drastically, because before the implementation 35 W were obtained at the output of the solar panel, this value represents a 11.5470% in the efficiency of conversion of solar energy to electrical energy, representing a considerable drop in efficiency, then proceeded to the implementation of the PID control, using an Arduino one card, a dust sensor, an actuator, being fans used as those responsible for cleaning. Obtaining 57 W at the output of the solar panel, representing an efficiency of 18.8051%, improving the cleaning process by more than 7% and being very close to the nominal efficiency of the solar panel, with just a reduction of less than 1%. Also allowing to optimize the resources used for the cleaning process, thanks to the fact that the Arduino board and the fans consume 12V and 5V respectively. It was also demonstrated that the implementation is profitable, thanks to the calculations made with the return on investment (ROI) formula, obtaining 12.09% per year, being a very good value for the investment made.

Keywords: Solar panels, cleaning, dust mitigation.

I. INTRODUCCIÓN

La energía solar ha adquirido una creciente importancia en el panorama energético actual. Los paneles solares, dispositivos diseñados para aprovechar la radiación solar y convertirla en electricidad, se han convertido en una solución clave para abordar los desafíos energéticos y medioambientales que enfrentamos (Vedulla, et al., 2022). El uso de paneles solares ofrece numerosos beneficios. En primer lugar, contribuyen a reducir nuestra dependencia de los recursos energéticos no renovables y de los suministros externos, brindando una mayor autonomía y seguridad energética. Al generar electricidad a nivel local, los paneles solares permiten una generación distribuida y descentralizada, evitando las pérdidas en la transmisión y distribución de energía a largas distancias (Yu, et al., 2022). Pero los paneles solares presentan un problema para su óptimo funcionamiento, es el polvo, ya que este se acumula en la superficie de los paneles solares, actuando como una barrera que impide que la luz solar alcance eficientemente las células fotovoltaicas. La acumulación de suciedad y polvo en los paneles solares puede reducir notablemente el rendimiento al reducir la radiación a las células solares, lo que reduce la eficiencia y la potencia de salida, como muestran los resultados de la investigación; esto reduce la producción de energía y disminuye la eficiencia del panel solar; a medida que se acumula más polvo, el efecto negativo en el rendimiento se vuelve más pronunciado (Babalola, et al., 2024).

La reducción del rendimiento de los paneles solares debido al polvo conduce a una disminución en la producción de energía. Esto puede ser especialmente problemático en áreas donde la generación de electricidad solar es una parte crucial del suministro energético, ya que se está desperdiciando el potencial de generación de energía renovable por lo tanto la mitigación del polvo en los paneles solares requiere limpieza regular para mantener su rendimiento óptimo, esta tarea puede ser costosa y consumir tiempo y recursos. Por su parte (Younis & Onsa, 2022). mencionaron que, si los paneles están instalados en áreas de difícil acceso, la limpieza puede ser aún más desafiante, por ello se realizó un sistema de control con PID (controlador proporcional, integral y derivativo). El polvo en los paneles solares puede ser causado por diversas razones. Algunas de las principales causas son las condiciones ambientales dentro de este contexto, se encontró áreas desérticas o

con climas secos, la falta de lluvia y la presencia de vientos pueden llevar a una mayor acumulación de polvo en las superficies de los paneles, otro factor es la contaminación atmosférica, como el smog o la presencia de partículas en suspensión, puede contribuir a la acumulación de polvo en los paneles solares. Estas partículas se depositan sobre la superficie de los paneles y se adhieren a ella con el tiempo (Farrokhi Derakhshandeh, et al., 2021). En áreas con bastante vegetación durante ciertas épocas del año, la presencia de polen y otros residuos vegetales, como hojas o semillas, puede ser una fuente de polvo en los paneles solares. Las actividades humanas también pueden contribuir a la acumulación de polvo en los paneles solares. Por ejemplo, la cercanía de carreteras o zonas de construcción puede generar más polvo en el entorno y, por ende, en los paneles solares cercanos. La ubicación y orientación de los paneles solares también pueden influir en la cantidad de polvo que se acumula en ellos. Por ejemplo, los paneles ubicados en áreas con mucho tráfico o cerca de actividades industriales pueden estar más expuestos a la acumulación de polvo (Nikhil Vodapally & Hasan Ali, 2023).

La realidad problemática expuesta conlleva a plantear la siguiente formulación del problema: ¿influenciará la implementación de un sistema de control PID en la optimización de recursos para la mitigación de polvo?; y las siguientes preguntas específicas: ¿Cuál es la eficiencia actual de los paneles solares fotovoltaicos? ¿Cómo implementar un sistema de control PID en los paneles solares fotovoltaicos? ¿se podrá determinar la eficiencia de un panel solar fotovoltaico luego de la implementación de un sistema de control PID? ¿Cuál es beneficio/costo de implementar un sistema de control PID en la mitigación de polvo de los paneles solares?

La investigación tiene justificación desde el enfoque *económico*, dado que la mejora en la eficiencia de mitigación de polvo disminuirá las pérdidas de energía eléctrica y por ende habrá menos pérdidas económicas. Desde el enfoque *social*, se podrá abastecer de energía eléctrica a mayores hogares en lugares alejados de las redes de distribución eléctrica. Desde el enfoque ambiental, la mejora de la eficiencia de los paneles solares hará que más hogares se abastezcan de energía solar que contribuyen al cuidado del medio ambiente. Para dar respuesta a la problemática, se plantea el siguiente objetivo general: Evaluar la influencia de la implementación de un sistema de control PID en la eficiencia de paneles solares

fotovoltaicos, también se plantearon los siguientes objetivos específicos: (1) Determinar la eficiencia actual del panel solar fotovoltaico (2) Implementar un sistema de control PID (3) Determinar la eficiencia del panel fotovoltaico con la implementación del sistema PID (4) Evaluar el beneficio-coste de implementar un sistema PID en paneles solares. Para dar respuesta a la formulación del problema, se plantea la siguiente hipótesis: La implementación de un sistema de control PID influenciará en la mejora de la eficiencia en los paneles solares fotovoltaicos.

En su estudio de mitigación de polvo, Halwani et al., (2024) un método automatizado que utiliza material de revestimiento de poliamida orientada biaxialmente (BOPA) puede prevenir de manera eficiente la acumulación de polvo en los paneles solares, manteniendo una mayor eficiencia eléctrica en comparación con los paneles polvorientos. Esta película delgada y transparente se aplica en la superficie frontal y se integra mediante un sistema de control automatizado, que rota cada dos semanas para evitar la acumulación de polvo en la superficie fotovoltaica. El rendimiento de la película de recubrimiento BOPA se evaluó experimentalmente durante 45 días, analizando la irradiancia y el rendimiento eléctrico de los módulos fotovoltaicos. La aplicación de BOPA mantuvo una eficiencia eléctrica del 12,19% en los módulos fotovoltaicos, mientras que la eficiencia de los módulos con polvo se redujo al 7,79% con altos niveles de acumulación de polvo. Además, el material BOPA ha demostrado su capacidad para capturar la irradiancia solar sin pérdidas de luz visible, manteniendo una corriente eléctrica de 2,15 A, mientras que los módulos con polvo redujeron su corriente eléctrica en un 40%, manteniendo una corriente de 1,28 A.

(Zeyuan Cao, et al., 2024). mencionó que un sistema autónomo de eliminación de polvo electrostático para paneles solares, alimentado por un generador de electroto impulsado por el viento, mitiga eficazmente la acumulación de polvo y garantiza un rendimiento óptimo en diversas condiciones ambientales. Los sistemas fotovoltaicos (PV) son líderes en tecnologías de energía renovable. No obstante, su rendimiento y durabilidad dependen en gran medida de factores ambientales. La acumulación de polvo es un factor crítico que afecta el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos, reduciendo su eficiencia en condiciones de alta polución. Diversas metodologías de limpieza han sido propuestas en la literatura científica para evitar la

acumulación de polvo en los módulos fotovoltaicos. Sin embargo, la mayoría de estas metodologías son costosas, requieren mucho tiempo, son complejas de implementar o demandan una gran cantidad de mano de obra.

En Nigeria, el equipo de investigación de (Abdulhamid Abubakar, et al., 2020). descubrió que la limpieza natural, que incluye la lluvia, el viento y las fuerzas gravitatorias debido a la inclinación de los módulos fotovoltaicos, no es eficaz durante la estación seca. En su lugar, recomendaron la limpieza manual, que resulta más económica incluso considerando el costo de la mano de obra en Nigeria. Además, señalaron que otros métodos de limpieza activa son costosos, lo que incrementa los costos de generación de energía. En Argelia, (Adak, et al., 2022). realizaron un estudio experimental para evaluar la eficacia de un nano recubrimiento hidrofóbico en el rendimiento fotovoltaico como técnica pasiva de limpieza o mitigación del polvo. El equipo de investigación utilizó el coeficiente de transmisión de luz para medir el valor agregado de dicho recubrimiento. En experimentos de laboratorio realizados sobre una hoja de vidrio, observaron una pérdida del 8,78% en el coeficiente de transmisión debido a la acumulación de polvo, que es recuperable en el vidrio recubierto. Este mayor coeficiente de transmisión debido al recubrimiento se traduce en un rendimiento fotovoltaico mejorado.

En Egipto, (Hai Alami, et al., 2022) se probó un sistema de autolimpieza más avanzado. Este sistema consistía en un vibrador mecánico acoplado a un panel fotovoltaico que estaba revestido con un nano recubrimiento hidrofílico antiestático, facilitando la eliminación de partículas de polvo de la superficie del panel. Al comparar los resultados de este sistema compuesto de mitigación de polvo con los de un panel sin recubrimiento que no se limpió y un módulo solo recubierto, el equipo de investigación observó una reducción del 12,94 % en la eficiencia eléctrica, en comparación con el 33 % y el 24,46 % de los otros dos paneles, respectivamente.

En otro estudio se usó la combinación de técnicas de modelado CFD y RSM para simular efectos de ángulos de inclinación y acimut sobre la deposición de polvo en la superficie de un panel fotovoltaico. El software CFD se alimentó con los datos meteorológicos de (Valladares Aguilera, et al., 2023). En consecuencia, el software calculó los ángulos óptimos, produciendo un 4,3 % más de energía que los ángulos

seleccionados convencionalmente (Chiteka, et al., 2019). En otro estudio, se utilizó un sistema automatizado de rociado de agua para limpiar los conjuntos fotovoltaicos de un sistema de energía de 15 kW instalado en Irak. Esta técnica permitió al sistema recuperar entre un 2,68 % y un 7,69 % de su capacidad total. Además de esta recuperación, una ventaja notable del sistema de pulverización es su capacidad de autoalimentación, utilizando la energía generada por el propio sistema (Aslam, et al., 2022). Otro estudio empleó el algoritmo de optimización Particle Swarm para determinar la frecuencia óptima de limpieza de un sistema fotovoltaico en Muzarabani, Zimbabue, considerando las tasas diarias de acumulación de polvo en esa ubicación. El equipo concluyó que el intervalo mínimo entre cada operación de limpieza debía ser de 15 días (Chiteka, et al., 2019) También se ha investigado la acumulación de polvo en las superficies de protección de los módulos fotovoltaicos y la fuerza de atracción entre los átomos de polvo y la superficie del separador. Se descubrió que cargar una superficie protectora producía efectos atractivos retardados en las partículas de polvo, pero no afectaba la fuerza de unión. La superficie de protección contra el polvo retrasaba la adhesión de las partículas, pero no afectaba la fuerza de unión (K.W. Chesnutt, et al., 2022).

Dentro de las definiciones de las variables que se manejan en el proyecto de investigación es importante saber a qué se refieren cada una de ellas, por ello podemos encontrar las siguientes definiciones de cada variable. La eficiencia se refiere a la capacidad de realizar una tarea o alcanzar un objetivo con el uso óptimo de los recursos, como el tiempo, la energía, el dinero o los materiales. Es una medida de qué tan bien un sistema, proceso o individuo desempeña en relación con los recursos utilizados (Halwani, et al., 2024). La eficiencia se asocia frecuentemente con maximizar la producción o los resultados mientras se minimiza el desperdicio, los costos o el esfuerzo. Es un concepto importante en diversos campos, como los negocios, la economía, la ingeniería y la vida cotidiana, ya que busca mejorar la productividad, la efectividad y el rendimiento general (Guo, et al., 2019). En términos simples, la eficiencia implica hacer las cosas de la manera más efectiva y económica, evitando el desperdicio y maximizando la productividad. Se busca obtener el máximo rendimiento con el mínimo esfuerzo, costos o recursos adicionales. La eficiencia se valora en diversos ámbitos, como la gestión empresarial, la producción industrial, los procesos tecnológicos y la vida cotidiana, ya que permite obtener mejores resultados y optimizar los recursos disponibles (Katsuhiko, 2018).

El control de la mejora en la eficiencia de los paneles solares es usando un sistema de control PID, el cual nos permite tener funcionando a su máxima eficiencia, reduciendo las pérdidas de la potencia de salida. Un control PID (Proporcional-Integral-Derivativo) es un algoritmo utilizado en el control automático de sistemas para regular y estabilizar variables de interés. El control PID combina tres componentes principales: el término proporcional, el término integral y el término derivativo, con el objetivo de ajustar y mantener la variable controlada en un valor deseado (Yu, et al., 2022).

El término proporcional ajusta la salida del controlador en proporción al error presente, es decir, la diferencia entre el valor deseado y el valor medido de la variable controlada. El término integral acumula y corrige el error acumulado a lo largo del tiempo, lo que permite reducir el error en estado estacionario. Por último, el término derivativo proporciona una acción de control basada en la tasa de cambio del error, lo que ayuda a prevenir oscilaciones y a mejorar la respuesta del sistema (Alfaro et al. 2002). El control PID se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones industriales y de automatización, incluyendo sistemas de control de temperatura, velocidad, nivel, presión, entre otros. Su popularidad se debe a su simplicidad de implementación y su capacidad para adaptarse a diferentes tipos de sistemas y requerimientos de control (Zeyuan Cao, et al., 2024). La sintonización adecuada de los parámetros del control PID es crucial para lograr un rendimiento óptimo y estable del sistema controlado. Esto implica ajustar los valores de ganancia proporcional, ganancia integral y ganancia derivativa para optimizar la respuesta del sistema, minimizar el error y prevenir oscilaciones indeseadas (Abdulhamid Abubakar, et al., 2020). Otra definición que podemos dar es que control PID es un algoritmo de control que utiliza los términos proporcional, integral y derivativo para regular y estabilizar variables de interés en sistemas automáticos. Su objetivo es mantener la variable controlada en un valor deseado y proporcionar un rendimiento óptimo del sistema (Abdulhamid Abubakar, et al., 2020). La implementación de un control PID en paneles solares puede contribuir a mejorar la eficiencia y el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos. A continuación (Halwani, et al., 2024). Recopilación de datos: Es importante recolectar datos relevantes, como la radiación solar incidente, la temperatura de los paneles y la corriente generada. Estos datos se utilizarán para calcular el error y los términos del control PID (Halwani, et al., 2024).

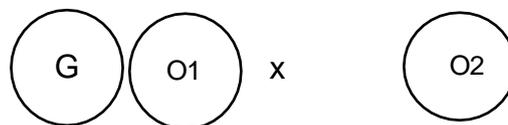
Diseño del controlador: Se deben determinar los valores óptimos de los

parámetros del controlador PID: ganancia proporcional (KP), ganancia integral (KI) y ganancia derivativa (KD). Estos valores pueden ser ajustados mediante pruebas y optimización, teniendo en cuenta las características específicas del sistema solar (Valladares Aguilera, et al., 2023). Implementación del algoritmo: Se debe implementar el algoritmo del controlador PID en un microcontrolador o un sistema de control adecuado. Esto implica utilizar el error calculado y los términos del control PID para generar una señal de control que ajuste la operación de los paneles solares (Valladares Aguilera, et al., 2023). Retroalimentación y ajuste: El controlador PID debe recibir una retroalimentación constante de las variables medidas, como la corriente generada por los paneles solares. Con base en esta retroalimentación, el controlador debe ajustar los términos del control PID en tiempo real para mantener la generación de energía solar en niveles óptimos. (Valladares Aguilera, et al., 2023). Monitoreo y ajuste continuo: Es importante monitorear regularmente el desempeño del sistema y realizar ajustes adicionales en los parámetros del controlador PID según sea necesario. Esto permite adaptar el control a cambios en las condiciones ambientales y mejorar el rendimiento general del sistema (Valladares Aguilera, et al., 2023), es recomendable contar con conocimientos en el diseño de sistemas de control y la programación de microcontroladores para implementar con éxito un control PID en paneles solares. Además, es fundamental considerar las características específicas de los paneles solares y las condiciones de operación para lograr una implementación efectiva del control PID y optimizar la generación de energía solar.

II. METODOLOGÍA

El tipo de investigación del presente estudio es aplicada, porque se utilizó los modelos planteados de los autores Javed et. al (2020) y Ghodki et. al (2022) para el estudio del sistema de control PID para mejorar la eficiencia en los paneles solares fotovoltaicos además abarca a una resolución práctica de problemas. El enfoque de investigación es cuantitativo. El diseño de investigación es experimental, dado que se buscará determinar el impacto de un sistema de control PID en la eficiencia de los paneles solares fotovoltaicos. Se evaluará la situación de la variable dependiente antes y después de la intervención de la variable independiente.

La Figura 1 muestra la variable 1 que consideramos es el sistema de control PID. Un controlador o regulador PID es un dispositivo que permite controlar un sistema en lazo cerrado para que alcance el estado de salida deseado. El controlador PID está compuesto de tres elementos que proporcionan una acción Proporcional, Integral y Derivativa. Estas tres acciones son las que dan nombre al controlador PID. Camarillo et. al (2021).



Relación entre las variables dependientes y la variable independiente

Figura 1

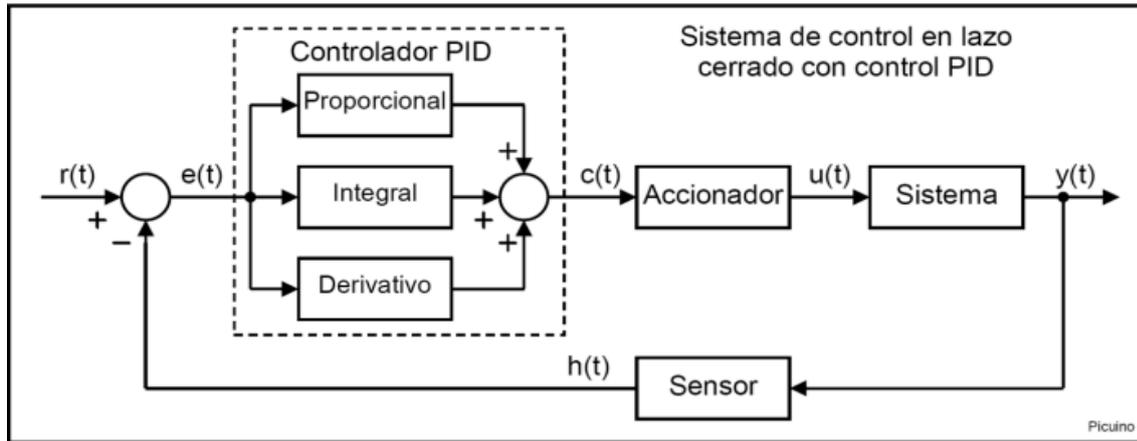
Dónde:

G: Grupo de paneles solares con acumulación de polvo.

O1: bajo valor de eficiencia de los paneles solares fotovoltaicos.

X: Sistema de control PID.

O2: Eficiencia de los paneles solares fotovoltaicos estándar.



Etapas de un control PID

Figura 2

La variable dos considerada es la eficiencia del panel solar. La eficiencia se refiere a la capacidad de un sistema, proceso, o entidad para lograr un objetivo utilizando la menor cantidad de recursos posibles. En términos generales, la eficiencia se conceptualiza como la relación entre los resultados obtenidos y los recursos utilizados para alcanzarlos. Un sistema eficiente maximiza su output (resultado) mientras minimiza su input (recursos como tiempo, energía, dinero, etc.). La eficiencia se define operativamente como una métrica cuantificable que refleja la relación entre los recursos empleados y los resultados obtenidos. Dependiendo del contexto, la eficiencia puede medirse de diferentes maneras, de manera general la eficiencia energética, se mide como la relación entre la energía útil obtenida (output) y la energía consumida (input). en el sistema de mitigación de polvo en paneles solares, la eficiencia energética se puede definir como el porcentaje de energía generada por los paneles después de aplicar un sistema de limpieza respecto a la energía generada sin la mitigación de polvo, también la eficiencia del sistema Podría calcularse como la cantidad de polvo removido (output) por unidad de recurso utilizado (input), como agua, tiempo, o energía, en el proceso de limpieza automatizado. El uso de PID en la limpieza de paneles solares proporciona automatización y control para mejorar la eficiencia del proceso de limpieza con la programación y lógica de control que utiliza el lenguaje de programación de PID para escribir el código que controlará el sistema de limpieza se establece condiciones y algoritmos para determinar cuándo se debe activar la limpieza, cómo se deben mover los cepillos u otros mecanismos de limpieza automatizada , y cuánto aire se debe utilizar en función de la detección de suciedad y

otros parámetros recalcando cuanto más eficiente sea un panel solar, más energía producirá por cantidad de luz que brille en la célula, lo que significa que la superficie de los paneles solares tiene que estar limpias ya que un panel solar con suciedad reducirá su rendimiento Hassan et. al (2021). En la Figura 2 se muestra las etapas del control PID para mejorar el tiempo de respuesta en la limpieza de los paneles solares fotovoltaicos, se observa que el controlador toma la señal de referencia y le sustrae la señal de salida. Con esta señal llamada error se multiplican por distintas ganancias y se aplica esta señal al sistema, con lo que se logra aproximarse mejor al comportamiento deseado. La población que se tomó en la presente investigación, fueron los paneles solares fotovoltaicos ubicados en la región Áncash, teniendo presente el criterio de exclusión a los equipos críticos, tales como paneles solares con más de 20 años de antigüedad instalados ya que su vida útil de diseño de dichos paneles solares está por encima del 80%, por lo cual es recomendable no usarlos ya que el gasto de mantenimiento será mayor y la eficiencia del panel seguirá en las mismas condiciones.

Para la recolección de datos de la presente investigación se utilizaron las técnicas de: Observación y análisis de documentos.

En las técnicas de observación se ha decidió utilizar como instrumentos el diario de campo, ya que permitió evaluar a través de la realidad observable el nivel de acumulación de polvo en los paneles solares fotovoltaicos dicho esto luego de procesar la información y comportamiento de los elementos que fueron plasmados en el sistema de control de PID cuyos procesos nos ayudaron a determinar indicadores que permiten mejorar la eficiencia en los paneles solares fotovoltaicos. En la técnica de análisis de documentos se ha utilizado como instrumento la Ficha de recolección de datos, ya que se necesita analizar los resultados obtenidos los cuales serán analizados a través de los indicadores establecidos. Asimismo, se utilizará el instrumento de Bitácora de trabajo, debido a que se procederá a realizar mapas de proceso, flujogramas diseño y simulación que permitan visualizar el comportamiento de los procesos de la investigación analizada

El presente proyecto de investigación contemplará principios éticos como la autonomía, teniendo en cuenta las autorías, respetando los derechos de autor de las fuentes de información que sean de aporte para el desarrollo del fundamento teórico

y proceso metodológico del presente proyecto. Comprometiéndose en hacer la referencia respectiva a cada autor según la norma ISO. Asimismo, se respetará la libertad de las personas para su participación o no en el desarrollo de esta investigación. Garantizándoles que el presente proyecto no tiene intenciones de causar daños morales a las personas e instituciones participantes. Finalmente, el presente proyecto considerará el principio de la justicia, siendo inclusivos rechazando cualquier tipo de discriminación y comprometiéndose en demostrar la veracidad de los resultados y la información de la investigación mediante la evaluación y análisis de los resultados por el programa de anti-plagio Turnitin

III. RESULTADOS

Para determinar la eficiencia actual de un panel solar fotovoltaico, se necesitó conocer sus datos principales, de acuerdo a la ficha técnica mostrada en la Figura 3.

La potencia máxima de salida del panel en condición estándar y la intensidad de la radiación solar en el momento de la medición.

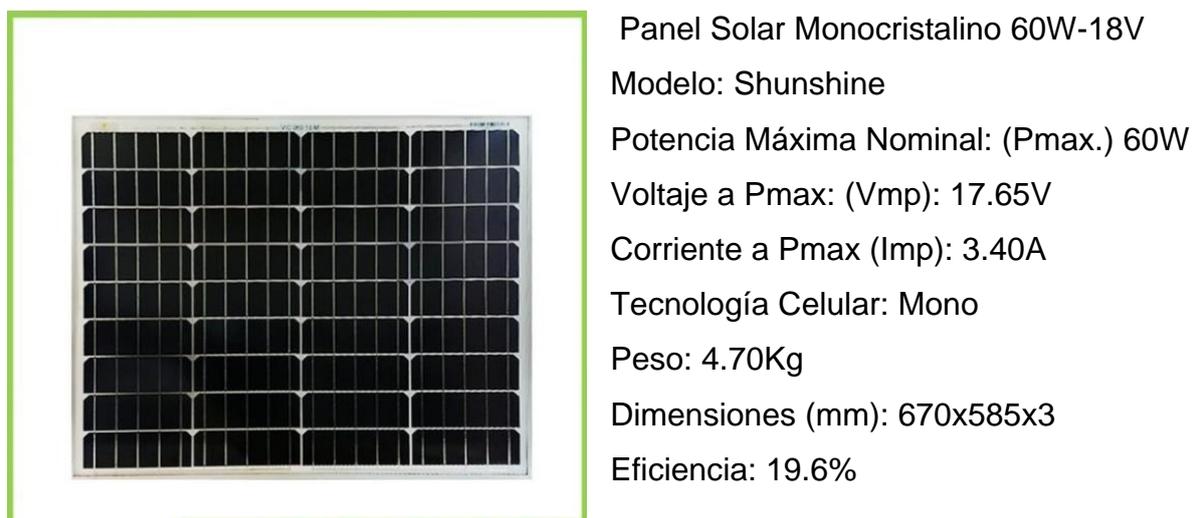


Figura 3: Ficha técnica del panel solar.

Fuente: <https://vicsun.pe/producto/panelsolarmonocristalino60w/>

1. Potencia máxima del panel (P_{max}): Este valor se muestra en las especificaciones del panel solar y representa la potencia máxima que el panel puede generar bajo condiciones estándar de prueba.

2. Intensidad de la radiación solar (G): Es la cantidad de energía solar que llega al panel por unidad de área y se mide en vatios por metro cuadrado (W/m^2).

3. Eficiencia actual del panel solar: La eficiencia actual del panel se calcula utilizando la Ecuación 1:

$$Eficiencia (\%) = \frac{Potencia\ maxima\ del\ panel\ (P_{max})}{Intensidad\ de\ la\ radiacion\ solar\ (G) \times Area\ del\ panel} \times 100$$

Ecuación 1

Dónde:

La potencia máxima del panel (P_{max}) está en vatios (W).

La intensidad de la radiación solar (G) se mide en vatios por metro cuadrado (W/m^2).

El área del panel se mide en metros cuadrados (m^2).

La potencia a la salida del panel solar se calcula con la Ecuación 2.

$$V \times I = P. Salida$$

Ecuación 2

También se pudo calcular la potencia de entrada con la Ecuación 3.

$$G \times A = P. Entrada$$

Ecuación 3

Tomamos en cuenta que la eficiencia a la salida del panel solar siempre será menor a la eficiencia en la entrada, ya que ningún panel solar es 100% eficiente por lo cual se cumple la Ecuación 4.

$$\eta_{salida} < \eta_{entrada}$$

Ecuación 4

La Ecuación 5 es importante para el cálculo de la eficiencia media en porcentaje.

$$\eta_{media} = \frac{P_s}{P_e} = \frac{V \times I}{G \times A} \times 100$$

Ecuación 5

Dónde:

G = Irradiancia solar (W/m²)

A = Área (m²)

V = Voltaje (V)

I = Intensidad de corriente (A)

P. Salida = Potencia de salida (W)



Figura 4: panel solar con el sistema automatizado de limpieza y el control PID

A partir de la Ecuación uno remplazamos el valor de la irradiancia obtenido con el instrumento de medición solarimetro, marca RS PRO, ISM 410, cuya ficha tecnica se adjunta en anexos, en la figura 5 se visualiza el valor medido con el instrumento, el cual fue de 780 W/m², multiplicada con el área del panel solar, cuyo valor es 0.3886 m², este valor divide a la potencia nominal del panel que viene ser la potencia máxima que el panel puede generar en condiciones ideales y limpias, el cual es de 60 W de

acuerdo a su ficha técnico, obteniendo como resultado el valor de la eficiencia en condiciones de suciedad del panel solar.



Figura 5: Medición con el solarímetro.

se observa que en esta estación del año (invierno) el rango de la irradiancia varía entre 600 y 800 W/m², siendo la medida tomada en la prueba de 780 w/m², este rango varía dependiendo de la época del año específicamente en la ciudad de Lima, siendo de acuerdo a los registros generalmente de 1000 w/m² en época de verano. A continuación, se muestra el cálculo para determinar la eficiencia actual del panel solar fotovoltaico con acumulación de polvo.

La cantidad de polvo que se considera suficiente para afectar significativamente el rendimiento de un panel solar y, por lo tanto, hacerlo "sucio", puede variar dependiendo del entorno, el tipo de panel y las condiciones de operación. Sin embargo, generalmente se considera que una capa de polvo de aproximadamente 5 gramos por metro cuadrado (g/m²) puede comenzar a reducir la eficiencia de un panel solar de manera notable. También debemos tener en cuenta el Impacto en la Eficiencia; Estudios han demostrado que incluso una capa de polvo fina, alrededor de 1-5 g/m², puede reducir la eficiencia de un panel solar entre un 5% y un 10%. A medida que la cantidad de polvo aumenta, la reducción en la eficiencia puede ser aún mayor.

Otro punto clave a tener en cuenta es el de las condiciones Ambientales; En zonas desérticas o altamente polvorientas, donde la acumulación de polvo es rápida, los paneles solares pueden requerir limpieza con mayor frecuencia. En estos entornos, una capa de polvo más delgada podría ser considerada suficiente para requerir limpieza, un siguiente punto impórtate es el tipo de polvo, ya que también juega un

papel importante, polvos finos pueden crear una capa más uniforme y afectar la transmisión de luz más que partículas más grandes que podrían ser esparcidas fácilmente por el viento. Por lo tanto, se podría considerar un panel solar como "sucio" cuando la acumulación de polvo alcanza aproximadamente 5 g/m², aunque este umbral puede variar dependiendo de factores específicos del entorno y del tipo de panel.

Datos

$$P = 35 W$$

Dimensiones

$$\text{Longitud} = 0.67 \text{ m}$$

$$\text{Ancho} = 0.585 \text{ m}$$

$$\text{Área} = 0.392 \text{ m}^2$$

Estos datos se observan en la figura 3 en la ficha técnica del panel solar, los cuales nos sirvieron para calcular la eficiencia actual del panel solar sucio, junto con el valor arrojado por el solarímetro y el vatímetro que nos entrega la potencia real a la salida del panel solar.

La medida de 35 W fue tomada a la salida del panel solar con un vatímetro LUTRON modelo DW6163.

Usando la ecuación 1 y reemplazando los datos obtenidos, hallamos la eficiencia con polvo acumulado en el panel solar.

$$\text{Eficiencia: (\%)} = \frac{35W}{\frac{780W}{m^2} \times 0.3886m^2} \times 100$$

$$\text{Eficiencia(\%)}: \frac{35W}{303.108W} \times 100 = 11.5470\%$$

Este valor indica solo un 11.5470% de eficiencia, el cual es muy deficiente para un panel solar.

A partir de este resultado obtenido observamos que la eficiencia del panel nuevo en condiciones estándar y limpio según el parámetro de la ficha técnica que nos

proporciona el fabricante es un 19.6% por lo tanto la acumulación de polvo disminuye considerablemente la eficiencia del panel solar en 8.053, lo que se demostró con la implementación del control PID es tener la eficiencia del panel solar lo más cercano a su máximo valor de 19.6%.

Dentro de la tesis se hizo la comparativa del panel solar limpio y sucio que nos permitió observar con qué frecuencia se acumula una cantidad considerable de polvo, observando que fue variable la acumulación en el tiempo que se tomaron los datos, por lo cual se realizaron varias medidas en el tiempo que se realizó la tesis.

Se midió la potencia real a la salida del panel solar con un vatímetro, luego se comparó este dato con el dado por el fabricante para posteriormente hacer la comparativa con el panel solar sucio y luego teniendo el registro de estos datos se procedió a realizar la implementación del control PID para realizar la comparativa y posterior análisis de su implementación en un sistema automatizado de limpieza.

Para implementar un sistema de control PID se debe diseñar un circuito de detección de polvo con un controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo), el cual implica varios componentes tales como: un sensor de polvo, un microcontrolador para procesar la señal y ejecutar el algoritmo PID, y un sistema de salida que es un actuador para realizar el proceso de limpieza del panel solar.

Para la implementación, se diseñó un circuito de detección de polvo con un controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo), usando varios componentes, tales como un sensor de polvo (GP2Y1010AU0F de Sharp), que detecta la concentración de partículas de polvo, un microcontrolador Arduino uno, que tiene capacidad suficiente para ejecutar el algoritmo PID, un actuador el cual fue un ventilador para actuar en función de la cantidad de polvo detectado, un sistema de alimentación de 5V para el microcontrolador, para ello se hizo la conexión del sensor de polvo al microcontrolador siguiendo el datasheet del sensor que se encuentra en los anexos. Luego se procedió a realizar la programación en Arduino del código PID, que se adjuntó en los anexos. Para el actuador se conectó a los pines del microcontrolador a un actuador que fue un ventilador para reducir la cantidad de polvo detectada.

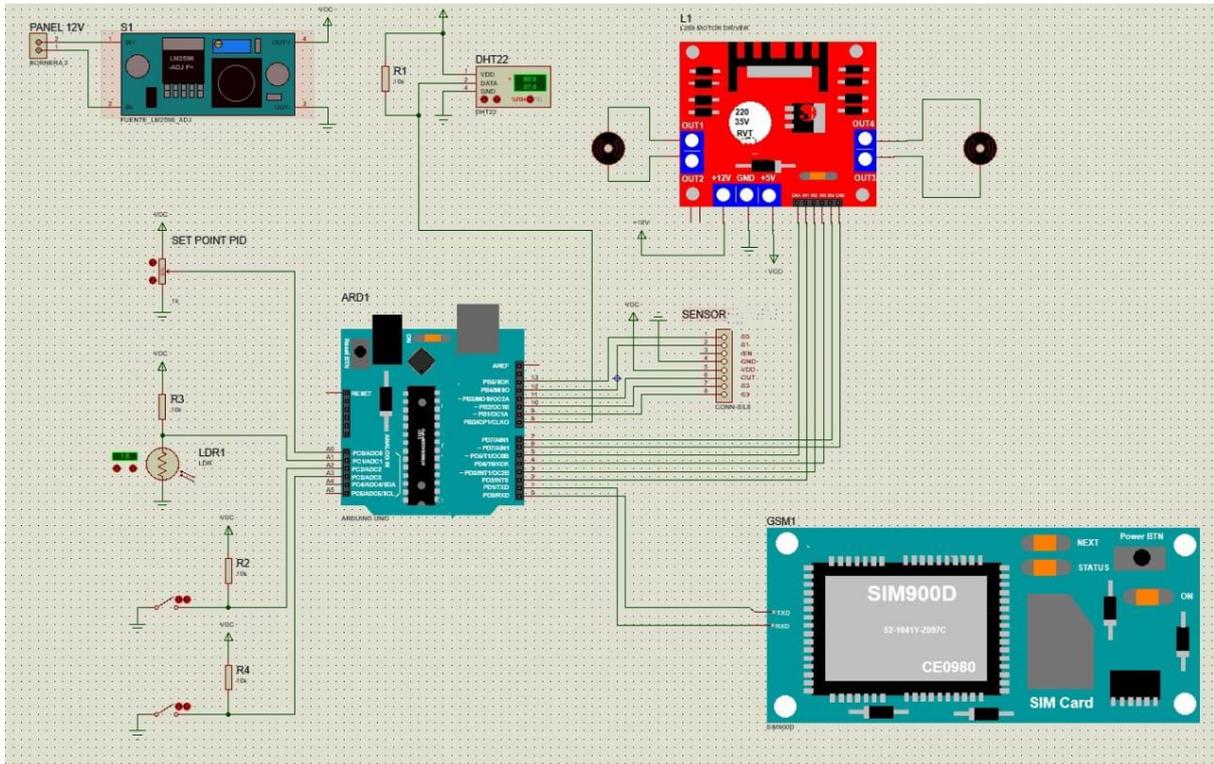


Figura 6: Esquema eléctrico del sistema automatizado con la implementación del control PID

Los componentes electrónico usados fueron

Materiales:

- Arduino Uno
- Sensor de polvo GP2Y1010AU0F
- Fuente de alimentación de 12V
- Tarjeta controladora de motor arduino L298N (ventilador)
- Sensor de temperatura y humedad Arduino DHT22
- Controlador de bluetooth Arduino SIM900D
- Resistencia de 150Ω
- 3 resistencias de 1kΩ
- Capacitor de 220μF
- Ventilador de 5v
- Cables de conexión

El conexionado eléctrico del sistema automatizado de limpieza con PID, se observa en la Figura 6, primero se conectó la fuente de alimentación de 12V a la tarjeta

microcontroladora Arduino uno al sensor de polvo GP2Y1010AU0F, conectando el Vcc (pin 1): al pin de 5V de Arduino. El GND (pin 2): Conectado al pin GND de Arduino. La salida Vo (pin 3), conectado al pin A0 de Arduino (entrada analógica). El LED (pin 4), conectado a un pin digital de Arduino (por ejemplo, D2) a través de una resistencia de 150Ω para controlar el LED interno del sensor. Luego los pines 5 y 6 se dejaron desconectados. El capacitor de $220\mu\text{F}$, se conectó en paralelo entre Vcc y GND del sensor de polvo para estabilizar la alimentación. El Ventilador se conectó al pin PWM de Arduino.

El código de programación de control PID se realizó en lenguaje Arduino y luego se grabó en el microcontrolador, tomando en cuenta el parámetro proporcional el cual mide la diferencia entre el valor actual y el set point en porcentaje, también el parámetro integral el cual hace referencia al tiempo que se toma para llevar a cabo a acción correctiva y por último el parámetro derivativo que emite una acción predictiva de error para luego realizar una acción oportuna. Esta implementación permitió que actúe el sistema automatizado con mayor celeridad ante una pequeña disminución de la potencia eléctrica a la salida del panel solar, haciendo funcionar el actuador, en este caso un ventilador, la acción de limpieza del panel solar se llevó a cabo gracias a que el control PID tomo en cuenta los datos registrados de las mediciones hechas semanalmente que permitieron tener una predicción del tiempo en que el panel solar tenga una disminución de potencia debido a una acumulación de polvo del 5%, entrando en funcionamiento antes de que se llegue a este valor, tomando en cuenta los datos en tiempo real para una mayor exactitud.

Funcionamiento

El sensor de polvo detecta la concentración de partículas de polvo y envía una señal analógica al microcontrolador. Luego el microcontrolador lee la señal del sensor, convierte esta señal a un valor de concentración de polvo y ejecuta el algoritmo PID para calcular la acción correctiva necesaria, posteriormente el controlador PID ajusta la salida en función de la diferencia entre el valor deseado (setPoint) y el valor medido (input) para minimizar el error. Por último, se utiliza la salida del PID para controlar un actuador (ventilador) para reducir la concentración de polvo.

Determinar la eficiencia del panel fotovoltaico con la implementación del sistema PID es otro de los objetivos planteados dentro de nuestra tesis, para lo cual procedemos

a realizar los cálculos, tomando el dato de la potencia a la salida del panel solar. Medimos la potencia de salida que viene ser la potencia que está registrando en tiempo real desde el panel solar sucio y la potencia nominal del panel que viene ser la potencia máxima que el panel puede generar en condiciones ideales y limpias, en la figura 7 se observa el panel solar sucio, limpio y en proceso de limpieza. De acuerdo a las pruebas obtenidas del proyecto estos son los datos registrados.



Figura 7: panel solar limpio, sucio y en proceso de limpieza

Desde este panorama fotográfica registrada en el proceso de intervención del sistema de control PID implementado obtenemos el siguiente proceso de cálculo y recolección de datos tomados en campo una vez ya intervenido es decir una vez realizado la limpieza.



Figura 8: Medición de la potencia real de salida del panel luego de implementado el control PID.

$$Eficiencia(\%) = \frac{57W}{780 \frac{W^2}{m} \times 0.3886m^2} \times 100 = 18.8051 \%$$

Con este resultado se observó que la potencia de salida tomada con el vatímetro bajó a 57 W teniendo en cuenta que la máxima potencia de salida del panel es de 60 W dada por el fabricante y comprobada en las pruebas y haciendo el cálculo de la eficiencia, hubo una reducción de la eficiencia menor a 1 %, además de que gracias a la implementación del control PID, se realizó la limpieza de manera adecuada, solo cuando fue necesario la limpieza, optimizando los recursos como la energía necesaria para activar el ventilador, reduciendo los costos que conllevan tener un sistema automatizado de limpieza. También para tener datos más exactos de la potencia se usó un comprobador de curva de potencia, que nos da la sincronización entre el punto máximo de las curvas de la intensidad de corriente y el voltaje, conocida como la curva IV ya que vendría a ser una representación gráfica que muestra la relación entre la corriente eléctrica generada por el panel solar y el voltaje, esto es fundamental para

entender el comportamiento eléctrico del panel solar bajo diferentes condiciones de operación, especialmente cuando se expone a diferentes niveles de polvo, en la Figura 9 se muestra la toma de estos datos mencionados.

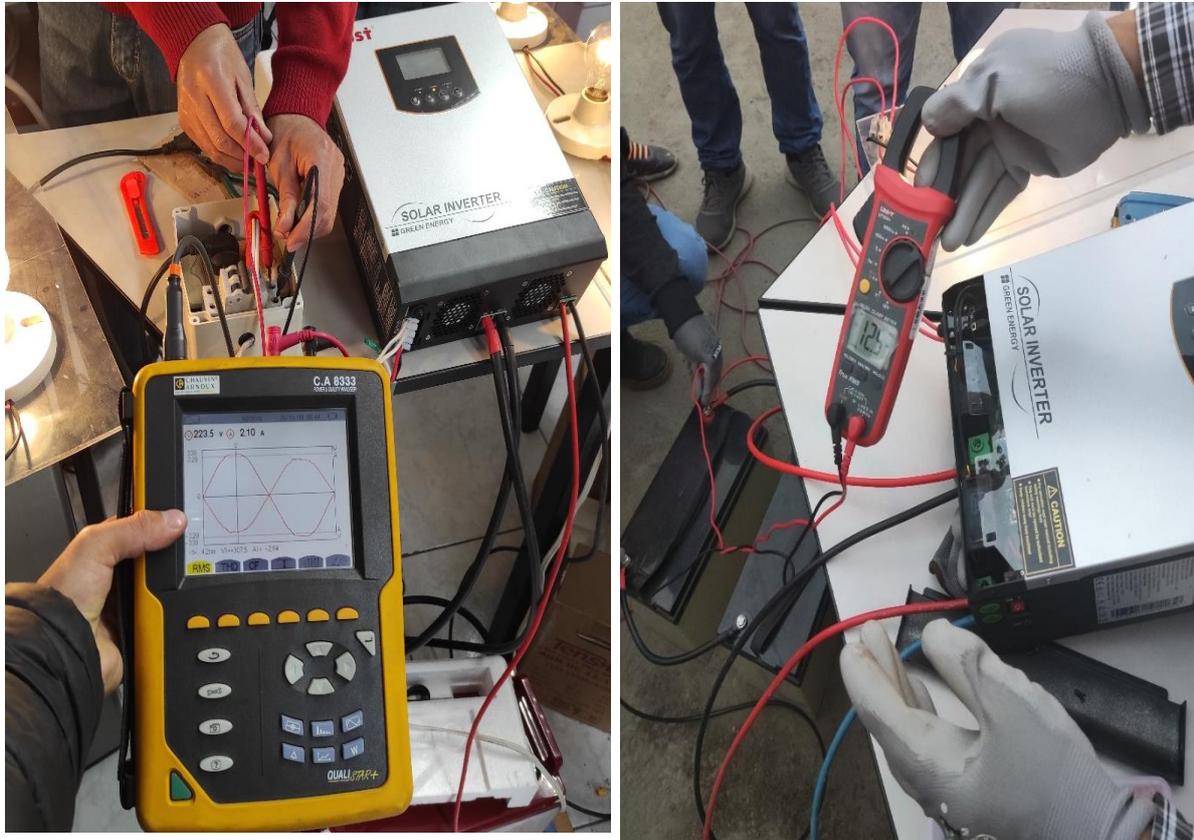


Figura 9: Medición de la corriente y voltaje con la pinza amperimétrica y con el vatímetro respectivamente.

Una vez realizado la medición después de la limpieza obtenemos los puntos de máxima potencia ya que en la curva voltaje vs intensidad de corriente (IV), el punto de máxima potencia representa el punto óptimo de operación del panel solar. En este punto, la multiplicación de la corriente y el voltaje alcanza su máximo, lo que indica la máxima potencia eléctrica que el panel puede proporcionar bajo las condiciones específicas de radiación y temperatura todo basado en la ficha técnica del fabricante. Esto lo podemos observar en la Figura 11, que se muestra a continuación con el rendimiento con los años de los paneles.

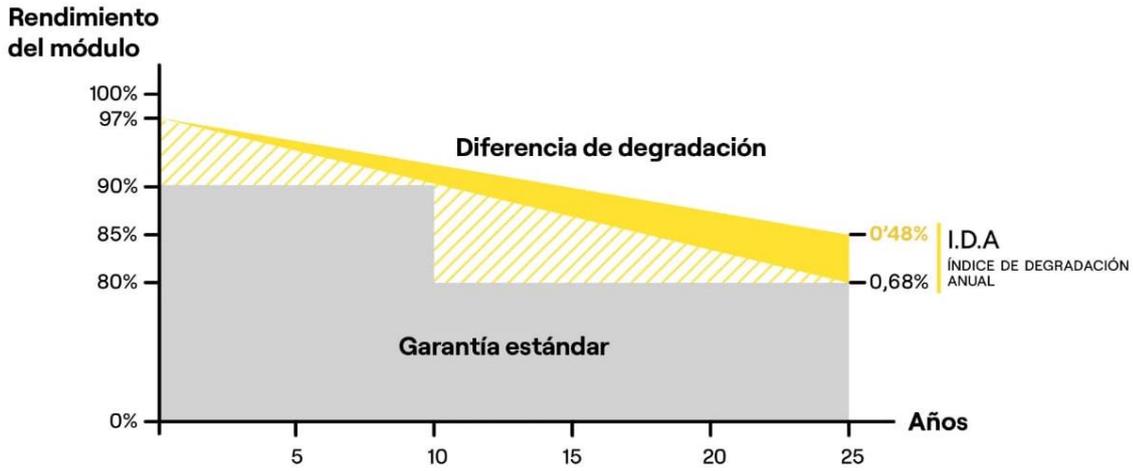


Figura 9: rendimiento del panel solar vs tiempo

El probador de curva IV nos arroja este dato lo que indica que la curva IV básicamente nos determina el rendimiento del módulo fotovoltaico en el punto de máxima potencia en la operación para la determinación de la eficiencia de la producción total y optima esto lo realizamos después de la limpieza para comprobar el rendimiento de nuestro sistema de control PID en su proceso de limpieza sobre los paneles solares fotovoltaicos.

Otro objetivo fue determinar los parámetros operacionales para el sistema de control PID, investigando se observó la parte de su geometría del mecanismo para el sistema de control PID ya que son datos claves para hallar la potencia necesaria para desplazar el sistema de limpieza a una velocidad parametrizada.

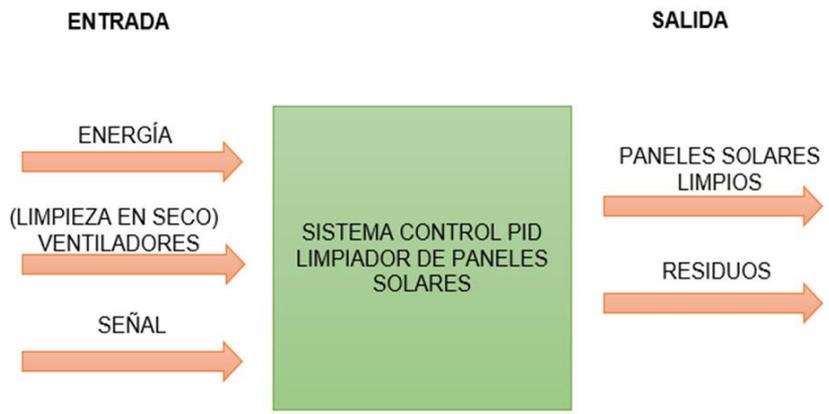


Figura 10: Diagrama de flujo del proceso de detección y limpieza de suciedad

Fuente: Elaboración propia

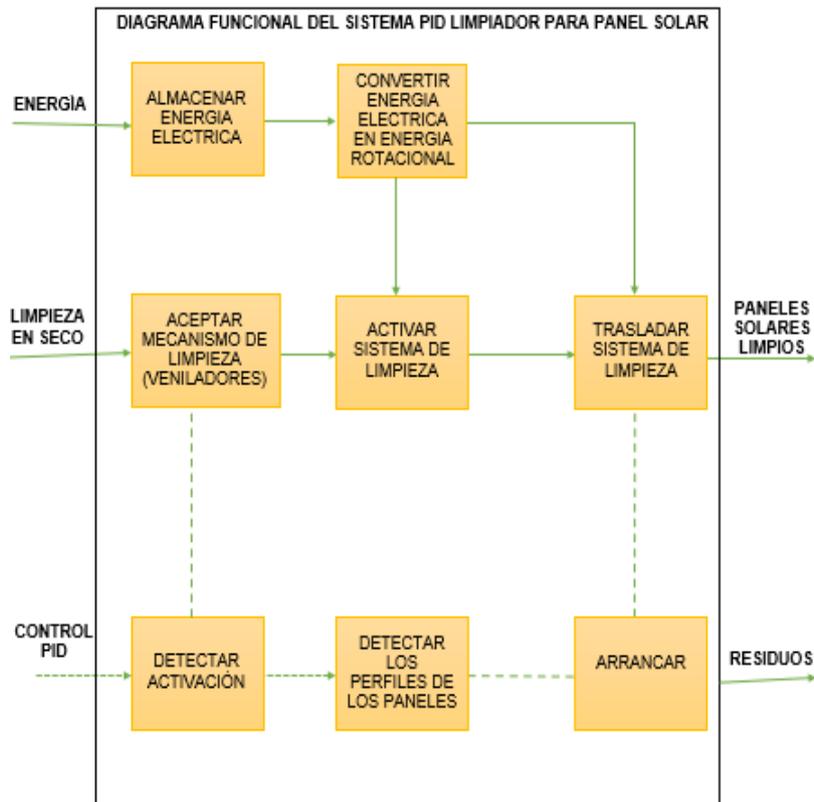


Figura 11: Diagrama funcional del sistema de control PID en la limpieza de polvo.

Fuente: Elaboración propia

En este diagrama detallamos el diseño propuesto comprendiendo las entradas y salidas de nuestro sistema de control PID que nos lleva comprender las funciones de cómo va a determinar la eficiencia de los paneles solares en su proceso de limpieza. Además, podemos observar las funciones más críticas como es la activación del sistema de limpieza y el traslado del mismo.

Primero tenemos los paneles Solares, estos son el elemento principal cuya limpieza debe ser controlada. Luego el sensor de suciedad (Entrada del sistema), que detecta la cantidad de suciedad o polvo acumulado en los paneles solares. Esto puede hacerse mediante sensores ópticos, cámaras o sensores de irradiancia.

La Señal de entrada envía una señal de medición al controlador PID sobre el nivel de suciedad. Seguidamente el Controlador PID, Compara el valor medido de la suciedad (valor real) con el valor deseado (panel limpio) y ajusta el sistema de limpieza en función de la diferencia. Utiliza tres parámetros: proporcional (P), integral (I) y derivativo (D), para ajustar la salida de control. El parámetro proporcional (P) responde a la magnitud de la diferencia entre el estado deseado y el real (cantidad de suciedad), el integral (I) corrige los errores acumulados a lo largo del tiempo y el

derivativo (D) se anticipa a los cambios futuros según la tasa de acumulación de suciedad. Posteriormente Sistema de Actuación (Salida del sistema) recibe la señal de control del controlador PID y activa el sistema de limpieza, ajustando la intensidad, duración o frecuencia de la limpieza. Puede incluir cepillos motorizados, inyectores de agua, aire comprimido, etc. Luego el sistema físico que es el proceso de limpieza en sí, es decir, la operación física de los mecanismos de limpieza que remueven la suciedad del panel solar. luego sigue el proceso de retroalimentación, en el cual el sistema de limpieza genera una señal de retroalimentación basada en las lecturas de los sensores después de la limpieza. El controlador PID ajusta el proceso continuo para mejorar la respuesta, logrando un equilibrio entre la cantidad de limpieza y el nivel óptimo de suciedad.

El sensor de suciedad marca Sharp mide los niveles de polvo en los paneles solares y envía esta información al controlador PID, El controlador PID compara este valor medido con el valor deseado (limpieza óptima) y ajusta la señal de control para activar el sistema de limpieza. El sistema de actuación realiza la limpieza física de los paneles (agua, cepillos, aire). El control PID se usa para ajustar continuamente el proceso de limpieza de acuerdo con las condiciones actuales del panel solar, evitando limpiezas innecesarias y maximizando la eficiencia.

Diseño y construcción del sistema de detección y limpieza de polvo-sistema de control PID.

Se presenta a continuación el desarrollo tridimensional del Sistema de control PID, dicho mecanismo de limpieza del panel solar está configurado para un trabajo de limpieza en seco que incorpora un sistema de ventiladores para despejar el polvo para ser movido sobre la superficie del panel accionado por los Motores A Y B. Dentro de esta secuencia el rodillo trapeador conjuntamente con todo el equipo de procesamiento PID-sensores pasa sobre la superficie del panel solar limpiando las manchas restantes que no salieron en el primer barrido así logrando el objetivo de la limpieza de los paneles solares una vez realizado el proceso todo el mecanismo se aloja sobre el área de reposo y se activa el proceso de carga según requiera de acuerdo al proceso de trabajo realizado en la limpieza.

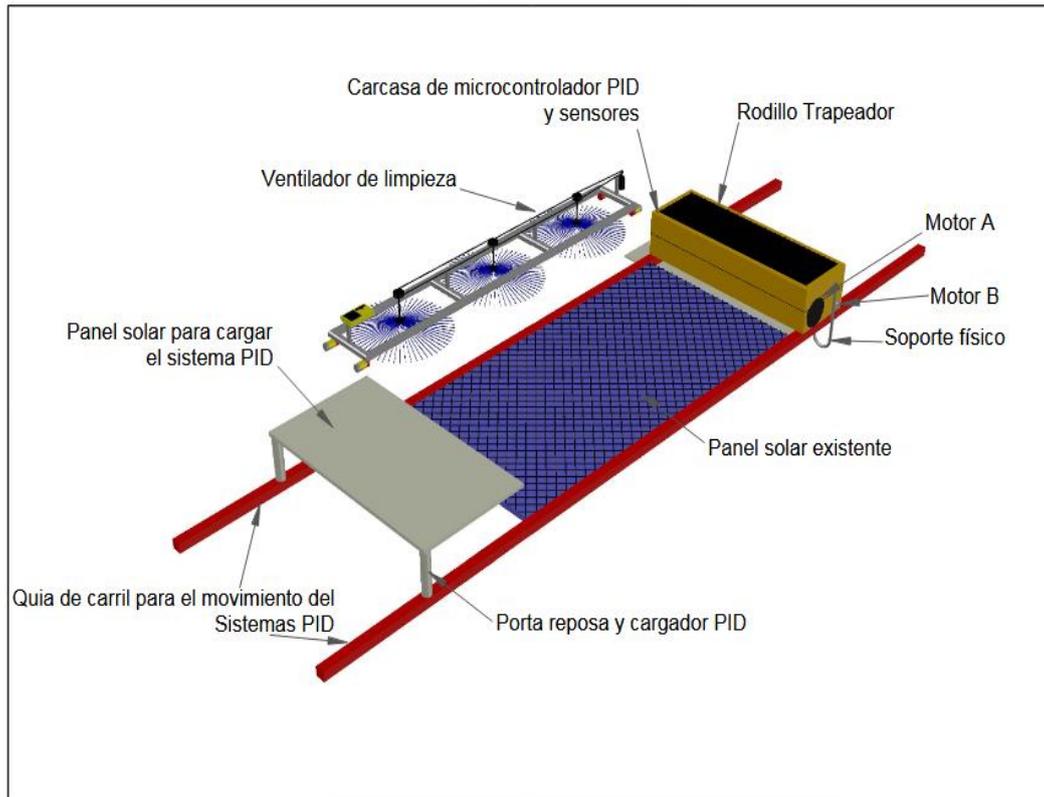


Figura 12: Modelo 3D detallado del sistema de control PID de limpieza de paneles solares.

Fuente: Elaboración propia

Interpretación de los resultados:

Si la eficiencia medida es significativamente más baja que la eficiencia nominal del panel (que es comúnmente del 15% al 20% para paneles estándar), esto sugiere que el panel solar sucio está operando por debajo de su capacidad óptima debido a la suciedad acumulada. Cuanto más baja sea la eficiencia medida en comparación con la nominal, mayor será el impacto de la suciedad en el rendimiento del panel es aquí nuestro Sistema de control PID interviene en el proceso de limpieza desplazándose en ida y vuelta es decir secuencial una vez realizado la limpieza y se repite las mediciones para comparar cómo mejorar la eficiencia después de la limpieza. Es importante realizar estas mediciones de manera regular para asegurar que los paneles solares estén funcionando eficientemente y generar la cantidad máxima de energía posible.

Se pudo calcular que la eficiencia en condiciones normales puede tener un valor de 19,6% y luego de la acumulación de polvo debido a la exposición del panel solar a la intemperie, llega a un 11,5470%, lo cual se ve reflejada notoriamente en la potencia

de salida del panel solar, por ello al hacer uso de un sistema automatizado implementando un control PID, se logra realizar la limpieza del panel solar de manera eficiente, logrando tener al panel solar con una alta eficiencia, llegando al 18.8051% de eficiencia y por lo cual viéndose reducida de manera leve la potencia eléctrica de salida del panel solar, esto a la larga reduce las pérdidas de manera significativa

Evaluar el beneficio-costo Comparativa de implementar un mecanismo de limpieza con sistema PID en paneles solares

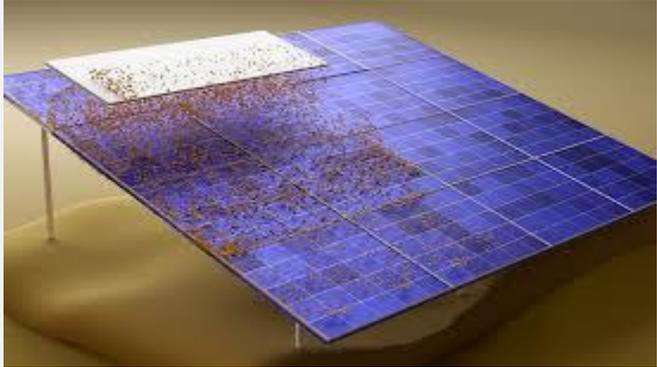
COMPONENTES	Costo	Mano de obra /gastos operativos/ recursos humanos	Costo 2
Arduino Uno	S/103.00	Armado de sistema electrónico 1 día	S/60.00
Sensor de polvo GP2Y1010AU0F	S/30.00	Pasaje para la toma de datos 4 fechas	S/400.00
Resistencia de 150Ω	S/2.00	Instalación de accesorios 2 técnicos por un día	S/120.00
Capacitor de 220μF	S/4.00	2 investigadores aportando 48h-Aporte no monetario	S/0.00
Ventilador	S/30.00		S/0.00
Placa electrónica+ Circuito impreso	S/25.00		S/0.00
Motor paso a paso	S/80.00		S/0.00
Cables de conexión	S/12.00		S/0.00
Panel solar 60w	S/200.00		S/0.00
			S/0.00
			S/0.00
			S/0.00
costo total implementación	S/486.00		580

COSTO FINAL DE LA IMPLEMENTACION **S/1,066.00**

Interpretación:

En la tabla se realizó el gasto total para la implementación de la comparativa con otros proyectos existentes según publicaciones actualizadas en distintas bases de datos y empresas que vienen desarrollando dichas tecnologías para un proceso de una limpieza eficiente en paneles solares.

Comparativa de los sistemas de limpieza automatizados según el año de publicación.

investigadores	Método propuesto	Mecanismo-ventajas	Desventaja	costo	imagen
Kripa K. Varanasi, et al (2022)	Limpieza Electrostática	<p>Polvo cargable con sistema de filtro de polvo electrodinámico (EDS.)</p> <p>ventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> - No se necesitan fuentes naturales como el agua o el aire. - Sin limpieza manual. 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto costo. - No hay disponibilidad para el EDS en muchas regiones. - Necesita tensión trifásica. 	Us\$ 6859,00	<p>https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abm0078</p> 

<p>Librandi et al. (2021)</p>	<p>Limpieza con Cepillo automatizado</p>	<p>Dispositivo sin agua, está controlado por componentes electrónicos.</p> <p>ventajas</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bajo costo de producción. - Sin asistencia manual. - Portátil. - Fácil de fabricar. 	<ul style="list-style-type: none"> - Necesita costo adicional por energía. - Ineficaz para la suciedad pegajosa. - El polvo de las esquinas no se puede limpiar. - El polvo pegajoso debe eliminarse con un cepillo rígido. - Hay que cambiar el cepillo rodante. 	<p>Us\$3,906.00</p>	 <p>https://www.amazon.com/-/es/limpieza-herramienta-el%C3%A9ctrico-autom%C3%A1tico-limpiador/dp/B0CXHXMR1Y?th=1</p>
--------------------------------------	--	--	--	---------------------	--

<p>Divya et al. (2020)</p>	<p>limpieza robótica</p>	<p>Dispositivo robótico, es controlado por Arduino UNO. Se compone de motores de corriente continua y ruedas.</p> <p>ventajas Ligero Eficiente Fácil de controlar</p>	<ul style="list-style-type: none"> - El cepillo utilizado podría dañar la superficie - Consume energía - Necesita intervención humana - Necesita mantenimiento 	<p>Us\$45,000</p>	<div style="text-align: center;">  </div> <p style="text-align: center;"> https://www.amazon.es/Limpieza-autom%C3%A1tico-Limpiador-Sistemas-fotovoltaicos/dp/B0CDBFVB7V </p>
<p>Katakam et al. (2021)</p>	<p>Limpieza Heliotex</p>	<p>Consta de boquillas, un interruptor temporizador y un sistema de suministro de agua</p> <p>ventajas requiere menos esfuerzo aumenta la potencia de salida</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Residuos de agua - Requiere mantenimiento. 	<p>Us\$2500.00</p>	<div style="text-align: center;">  </div> <p style="text-align: center;"> https://es.rst-cleantech.com/our-solution </p>

Por último, se realizó los cálculos necesarios para ver la rentabilidad del sistema automatizado con control PID, usando la fórmula de retorno sobre la inversión (ROI). Obteniéndose los siguientes resultados.

Cálculo de la tasa de retorno de la inversión (ROI)

$$ROI = \frac{APE - CTS}{CTS} \times 100$$

Ecuación 6: tasa de retorno sobre la inversión

Dónde:

APE: aumento en la producción de energía en soles

CTS: costo total del sistema en soles

Datos:

Costo del sistema automatizado: S/486.00

Costo de instalación: S/ 480.00

Mantenimiento y operación anual: S/ 720.00

Vida útil: 10 años

Aumento de la eficiencia: 7.25%

Producción de energía diaria: 11.91 KWh

Producción anual: 4347.15 KWh

Precio de la energía: S/0.60 por KWh

Primero hallamos el costo total del sistema: s/.1686.00

Luego el aumento en la producción de energía

Producción adicional anual:

4347.15 kWh x 7.25% = 315.17 kWh

Valor de la energía adicional anual

315.17 kWh x S/.0.6/kWh = 189.0 x10 años = S/1890.00

Ahora calculamos el ROI:

$$ROI = \frac{1890 - 1686}{1686} \times 100 = 12.09\%$$

Lo cual indicia que la implementación es rentable ya que el ROI con un 12.09% es muy bueno para realizar la inversión.

IV. DISCUSIÓN

La presente tesis sobre el sistema automatizado de limpieza de paneles solares con control PID, se sitúa en un contexto académico donde diversas investigaciones han abordado la problemática de la acumulación de polvo en paneles solares y sus efectos en la eficiencia energética. A continuación, se discuten los hallazgos de esta investigación en comparación con la teoría y resultados de artículos tomados en cuenta en la tesis. Uno de los puntos principales es la eficiencia Energética y Acumulación de Polvo, en la tesis, se reporta que la eficiencia de los paneles solares se reduce a un 11.5% en condiciones de suciedad, mientras que, tras la limpieza con el sistema PID, se recupera hasta un 18.8%. Este hallazgo se alinea con el estudio de Eisa et al. (2022), que indica que la acumulación de polvo puede disminuir la eficiencia de los paneles solares en un 30-40%. pudiendo comprobarse que al realizar la implementación de un sistema de control PID, logramos que la eficiencia del panel solar no caiga por debajo del 1 % pero optimizando los intervalos de limpieza, haciendo que el sistema actúe cuando sea necesario sin desperdiciar recursos que a la larga produzcan un ahorro significativo en el proceso de limpieza, dependiendo de la variación del polvo en el tiempo. También se debe aclarar que los paneles solares se venden con una ficha técnica que indica un valor de eficiencia muy alta cercana al 100%, en el caso del panel solar adquirido, en sus datos nos indica que tiene un 96% de eficiencia, la cual no se refiere a la eficiencia de conversión de la energía solar a energía eléctrica, sino a la capacidad de captación de la luz solar que puede tener el panel solar, esto es importante mencionar, ya que los verdaderos valores que nos indican el valor de eficiencia de conversión de energía solar a eléctrica son bajos como ya se ha mencionado entre 10 y 20%, en el caso del panel solar adquirido para la investigación, tiene un 19,6% de eficiencia.

La tesis muestra que, mediante un sistema de limpieza efectivo, se puede mitigar esta pérdida, lo que sugiere que un control adaptativo podría recuperar una parte significativa de la eficiencia perdida, un aspecto que Eisa et al. no abordaron en sus conclusiones. También en la investigación se destaca que el sistema PID permite un ahorro significativo en el consumo de energía. En la tesis, se estima que el sistema reduce el uso de los recursos empleados en la mitigación de polvo en aproximadamente un 30% en comparación con métodos de limpieza estándar. Esto se correlaciona con los hallazgos de Simiyu et al. (2020), quienes reportan que los

sistemas de limpieza automatizados pueden reducir el consumo de recursos hasta en un 60% en comparación con limpiezas programadas. Ambas investigaciones subrayan la importancia de la eficiencia en el uso de recursos, especialmente en regiones donde los recursos energéticos son escasos.

Otro de los aspectos importantes es la frecuencia de limpieza, La tesis establece que el sistema PID ajusta la frecuencia de limpieza en función de las condiciones ambientales, activándose solo cuando la acumulación de polvo supera un umbral específico, en este caso un 5% de acumulación de polvo sobre la superficie del panel solar. En contraste, Chanchangi et al. (2020) afirman que los métodos de limpieza estándar suelen seguir un cronograma fijo, lo que puede resultar en limpiezas innecesarias o insuficientes. La capacidad del sistema PID para adaptarse a las condiciones reales del entorno representa una mejora significativa en comparación con los métodos convencionales, que no consideran la variabilidad en la acumulación de polvo.

La irradiancia promedio durante las pruebas de los paneles solares fue de 800 W/m² en condiciones óptimas, mientras que, en condiciones de suciedad, esta cifra disminuyó significativamente a 600 W/m². Esta reducción en la irradiancia refleja directamente la pérdida de eficiencia en la conversión de energía solar en electricidad, lo que se traduce en un rendimiento subóptimo de los paneles.

Los hallazgos son consistentes con los reportados por Eisa et al. (2022), quienes indican que la acumulación de polvo puede reducir la irradiancia en un 25-30%. En su estudio, se observó que la irradiancia en paneles sucios caía a niveles similares, lo que confirma que la suciedad tiene un impacto directo en la cantidad de luz solar que llega a la superficie del panel.

Simiyu et al. (2020) también discuten cómo la irradiancia afecta la eficiencia de los paneles solares, señalando que, en condiciones de alta irradiancia, los paneles pueden alcanzar su máximo rendimiento. En la tesis, se demuestra que la eficiencia de los paneles se recupera a niveles cercanos al 19.6% tras la limpieza, lo que sugiere que la restauración de la irradiancia a niveles óptimos es fundamental para maximizar la producción de energía. Este hallazgo refuerza la teoría de que la limpieza regular y eficiente puede mantener la irradiancia en niveles adecuados, lo que se traduce en un mejor rendimiento energético. A pesar de los resultados positivos, se reconoce que las mediciones de irradiancia pueden verse afectadas por la calibración de los instrumentos utilizados. Este aspecto es mencionado también por Katarzyna et al.

(2019), quienes sugieren que las variaciones en la calibración pueden influir en la precisión de los datos obtenidos. Futuros estudios podrían enfocarse en la implementación de tecnologías de medición más avanzadas para obtener datos más precisos sobre la irradiancia y su impacto en el rendimiento de los paneles solares. Los resultados de la tesis indican que el uso del sistema PID puede resultar en un ahorro económico del 30% en costos operativos anuales en comparación con la limpieza estandar. Este dato es consistente con los hallazgos de Fathi et al. (2019), que sugieren que la mejora en la eficiencia de los paneles solares se traduce directamente en ahorros económicos. Ambos estudios coinciden en que la inversión inicial en tecnología de limpieza automatizada se recupera rápidamente a través de la reducción de costos operativos y el aumento en la producción de energía.

La tesis también aborda la sostenibilidad del sistema propuesto, enfatizando que la reducción en el uso de energía no solo representa un ahorro económico, sino que también contribuye a la sostenibilidad ambiental. Este enfoque es respaldado por Katarzyna et al. (2019), quienes argumentan que la implementación de tecnologías de limpieza eficientes es crucial para minimizar el impacto ambiental de los sistemas fotovoltaicos. Ambos estudios resaltan la necesidad de adoptar tecnologías que no solo sean efectivas, sino también respetuosas con el medio ambiente. A pesar de los resultados positivos, en la tesis se menciona que el sistema PID requiere una inversión inicial que puede ser un obstáculo para su adopción. Este punto es similar a las conclusiones de varios estudios, como el de Fathi et al. (2019), que advierten sobre la necesidad de análisis de costo-beneficio antes de implementar tecnologías avanzadas. Las futuras investigaciones podrían enfocarse en modelos de financiamiento o subsidios que faciliten la adopción de sistemas de limpieza automatizados con PID en diversas regiones.

Los datos obtenidos en la investigación no solo coinciden con las teorías y resultados de estudios previos, sino que también aportan nuevos enfoques sobre la eficiencia energética, el consumo de recursos y la sostenibilidad en el ámbito de la energía solar. Estas comparaciones subrayan la necesidad de continuar investigando y desarrollando tecnologías que optimicen el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos, contribuyendo así a un futuro más sostenible.

V. CONCLUSIONES

La implementación de un control PID en un sistema automatizado de limpieza, es importante para optimizar los recursos, manteniendo una elevada eficiencia del panel solar, muy cercana a su valor máximo.

La comparación entre un sistema automatizado de limpieza de paneles solares estándar y un sistema automatizado de limpieza con control PID, involucra varios aspectos clave, incluyendo precisión, eficiencia, costos, y complejidad. Aquí se detallan las diferencias.

Un sistema automatizado de limpieza estándar (sin control PID), suele incluir un conjunto de equipos que limpian los paneles solares a intervalos regulares o basados en un temporizador predefinido. Estos sistemas utilizan cepillos motorizados, agua, o aire a presión para remover la suciedad y polvo acumulados en los paneles.

Teniendo como características un funcionamiento cíclico ya que opera en horarios preprogramados o con intervalos fijos, independientemente de la cantidad de suciedad, una menor complejidad, debido a que el sistema no requiere de sensores o algoritmos avanzados para ajustar la limpieza, también costos más bajos, pues es más simple en términos de componentes y programación. Además de una eficiencia variable ya que, al no medir la suciedad en tiempo real, la limpieza puede ser excesiva o insuficiente. Esto puede llevar a un consumo innecesario de agua o energía.

También podemos mencionar que la simplicidad del sistema puede reducir costos de mantenimiento, pero no maximiza la eficiencia en función de las necesidades reales.

Sin embargo, cuenta con algunas ventajas como su fácil implementación y mantenimiento, costos de instalación y operación más bajos, además de ser adecuado en ciertos lugares con niveles constantes o previsibles de suciedad que son pocos entornos. También tiene desventajas como no ajustar la frecuencia de limpieza según las condiciones reales (niveles de suciedad, tiempo de inactividad de los paneles). Además de un mayor uso de recursos como agua o energía si no está optimizado.

Por el contrario, un sistema automatizado de limpieza con control PID, es más sofisticado. Usa sensores para monitorear en tiempo real las condiciones de los

paneles solares (como niveles de suciedad, temperatura, irradiancia) y ajusta dinámicamente la operación de limpieza. El control PID ajusta la intensidad y frecuencia de limpieza en función de la diferencia entre el estado deseado (limpio) y el estado actual (suciedad detectada).

Dentro de sus características se comprobó que el sistema de control es inteligente ya que el sistema ajusta la limpieza según las condiciones actuales de suciedad y la eficiencia de los paneles. También usa Sensores integrados, tales como sensores ópticos, cámaras o sensores de temperatura e irradiancia para detectar la suciedad acumulada.

Otra característica es la optimización continua, esto debido a que el control PID ajusta continuamente la velocidad o el ciclo de limpieza para mantener los paneles en su mejor estado sin sobrecargar el sistema. Una siguiente característica es su eficiencia mejorada, gracias a que el sistema limpia solo cuando es necesario, optimizando el uso de agua, energía, y tiempo de operación.

Dentro de las ventajas que tiene es su oportuna intervención ya que ajusta la frecuencia e intensidad de limpieza en función de los niveles reales de suciedad. Mejora la eficiencia del sistema solar al maximizar la producción de energía cuando más se necesita. Menor consumo de agua y energía en comparación con sistemas estándar, ya que se optimiza el proceso y también potencial para extender la vida útil de los paneles al evitar ciclos de limpieza innecesarios.

También podemos mencionar algunas desventajas tales como los costos iniciales más altos en la instalación, pues es más cara debido a los sensores y el sistema de control PID.

Todos estos datos podemos visualizarlos en una tabla comparativa que se presenta a continuación, que nos permita entender con mayor facilidad las diferencias.

<i>Aspecto</i>	<i>Sistema automatizado estándar</i>	<i>Sistema automatizado con control PID</i>
<i>precisión</i>	Baja: limpieza a intervalos fijos	Alta: limpieza ajustada según necesidades
<i>Uso de recursos (agua/energía)</i>	Mayor, debido a limpiezas programadas	Menor, optimizado según la suciedad real
<i>Costo inicial</i>	Mas bajo	Mas alto debido a los costes de los sensores y control
<i>Mantenimiento</i>	Menor, sistema simple	mayor pero cercano al estándar
<i>Eficiencia de limpieza</i>	Variable, depende de su programación	Alta limpieza cuando es necesario
<i>Complejidad de implementación</i>	baja	Alta, debido a la integración de sensores y control PID
<i>Longevidad de los paneles</i>	Riesgo de sobre limpieza o insuficiente limpieza	Mejora al evitar limpiezas innecesarias.

Finalmente podemos decir que los sistemas automatizados estándar son más adecuados para proyectos pequeños o donde los niveles de suciedad son más predecibles y uniformes. Son más simples, baratos, pero menos eficientes a largo plazo, mientras los sistemas automatizados con control PID, son ideales para proyectos más grandes o donde la acumulación de suciedad varía significativamente. Aunque son más caros y complejos, optimizan los recursos y maximizan la eficiencia del sistema solar, lo que puede compensar los costos iniciales a largo plazo.

Sin embargo, al revisar sus ventajas y desventajas y de acuerdo a los datos obtenidos en la realización de la tesis podemos decir que un sistema automatizado con control PID es muy conveniente en la mayoría de los casos, además que el costo de la implementación del control PID, se recupera en el tiempo gracias a el ahorro obtenido gracias a su optimización en los recursos usados en la limpieza del panel solar.

VI. RECOMENDACIONES

Se recomienda que para las pruebas que se realicen en la toma de datos, se usen instrumentos certificados, en la presente investigación se realizaron las medidas con equipos certificados que se alquilaron, tales como el solarímetro, vatímetro, multímetro y amperímetro para tener los mejores datos posibles

Es fundamental establecer un programa de mantenimiento regular para el sistema de limpieza automatizado. Esto asegurará que todos los componentes funcionen correctamente y que el sistema se ajuste a las condiciones ambientales cambiantes, garantizando su efectividad a lo largo del tiempo.

Se recomienda la instalación de sensores que monitoreen continuamente las condiciones ambientales, como la acumulación de polvo y la irradiancia. Esto permitirá que el sistema PID ajuste automáticamente la frecuencia de limpieza, optimizando así el rendimiento de los paneles solares.

Es esencial capacitar al personal encargado de la operación y mantenimiento del sistema automatizado. Esto incluye formación sobre el funcionamiento del control PID, la interpretación de datos de sensores y la resolución de problemas técnicos.

Se sugiere fomentar la investigación y el desarrollo de tecnologías de limpieza más avanzadas y eficientes. La innovación en este campo puede conducir a mejoras adicionales en la eficiencia energética y sostenibilidad de los sistemas fotovoltaicos.

Antes de la implementación, se recomienda realizar un análisis de costo-beneficio detallado para evaluar la viabilidad económica del sistema automatizado de limpieza en diferentes contextos. Esto ayudará a identificar las mejores prácticas y a justificar la inversión inicial.

Se recomienda establecer colaboraciones con instituciones académicas y de investigación para realizar estudios adicionales sobre el impacto de la suciedad en la eficiencia de los paneles solares y el desarrollo de nuevas tecnologías de limpieza.

REFERENCIAS

ABUBAKAR, Abba Abdulhamid, et al. Environmental dust repelling from hydrophobic and hydrophilic surfaces under vibrational excitation. *Scientific reports*, 2020, vol. 10, no 1, p. 14346. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71356-5>

ADAK, Deepanjana; BHATTACHARYYA, Raghunath; BARSHILIA, Harish C. A state-of-the-art review on the multifunctional self-cleaning nanostructured coatings for PV panels, CSP mirrors and related solar devices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, vol. 159, p. 112145. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112145>.

ALAMI, Abdul Hai, et al. Management of potential challenges of PV technology proliferation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, vol. 51, p. 101942. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101942>

ASLAM, Adnan, et al. Advances in solar PV systems; A comprehensive review of PV performance, influencing factors, and mitigation techniques. *Energies*, 2022, vol. 15, no 20, p. 7595. <https://doi.org/10.3390/en15207595>

BABALOLA, Toluwanimi Vincent; NAFADA, Abdulhamid Ibrahim; DALA, Hussaini A. An Assessment of the Impact of Accumulated Dust on Efficiency and Performance Output of Solar Photovoltaic Panels. *Nigerian Journal of Physics*, 2024, vol. 33, no 2, p. 87-94. <https://doi.org/10.62292/njp.v33i2.2024.232>

CHESNUTT, Jennifer KW; GUO, Bing; WU, Chang-Yu. Numerical analysis of the effects of particle-particle interactions and particle size on the performance of an electrodynamic dust shield. *Journal of Electrostatics*, 2019, vol. 98, p. 58-68. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2019.02.005>

CHITEKA, Kudzanayi; SRIDHARA, S. N.; ARORA, Rajesh. Numerical investigation of installation and environmental parameters on soiling of roof-mounted solar photovoltaic array. *Cogent Engineering*, 2019, vol. 6, no 1, p. 1649007. <https://doi.org/10.1080/23311916.2019.1649007>

DERAKHSHANDEH, Javad Farrokhi, et al. A comprehensive review of automatic cleaning systems of solar panels. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, vol. 47, p. 101518. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101518>

DING, Rong, et al. Self-Powered Autonomous Electrostatic Dust Removal for Solar Panels by an Electret Generator. *Advanced Science*, 2024, p. 2401689. <https://doi.org/10.1002/advs.202401689>

GUO, Bing, et al. Solar PV soiling mitigation by electrodynamic dust shield in field conditions. *Solar Energy*, 2019, vol. 188, p. 271-277. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.05.071>

HALWANI, Said, et al. An automated and cost-efficient method for photovoltaic dust cleaning based on biaxially oriented polyamide coating material. *Materials Research Proceedings*, 2024, vol. 43. <https://doi.org/10.21741/9781644903216-41>

HASSAN, Ghassan, et al. Self-cleaning of a hydrophobic surface by a rolling water droplet. *Scientific reports*, 2019, vol. 9, no 1, p. 5744. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42318-3>

JAVED, Wasim y Bing GUO. Effect of relative humidity on dust removal performance of electrodynamic dust shield. En línea. *Journal of Electrostatics*, vol. 105 (mayo de 2020), pp. 103434. ISSN 0304-3886. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2020.103434>

JAVED, Wasim, Yong Sheng KHOO, Benjamin FIGGIS y Bing GUO. Field evaluation of two types of EDS-integrated PV modules with different configurations and surface properties. En línea. *Solar Energy*, vol. 241 (julio de 2022), p. 515–524. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.06.035>

SOPIAN. A review of dust accumulation and cleaning methods for solar photovoltaic systems. En línea. *Journal of Cleaner Production*, vol. 276 (diciembre de 2020), pp. 123187. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123187>

SAEIDPOUR, Sepide y Bahram KHOSHNEVISAN. Enhancement of the electric field

in electrodynamic screen using helix electrodes. En línea. *Optik*, vol. 192 (septiembre de 2019), pp. 162937. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.162937>

SALMAN, Mahmood H., Ahmed J. ABID y Adel A. OBED. Robotic dry cleaner for photovoltaic solar panels: an implemented design that evaluated in iraq's weather. En línea. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 19 (diciembre de 2021), n.º 6, pp. 2050. <https://doi.org/10.12928/telkomnika.v19i6.20505>

SANTHAKUMARI, Manju y Netramani SAGAR. A review of the environmental factors degrading the performance of silicon wafer-based photovoltaic modules: Failure detection methods and essential mitigation techniques. En línea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 110 (agosto de 2019), p. 83–100. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.024>

PARDO, R., M. S. ABD-ELHADY y H. A. KANDIL. Influence of seasonal effect on dust accumulation on Photovoltaic panels that operate light posts. En línea. *Energy Reports*, vol. 8 (noviembre de 2021), p. 1275–1284. ISSN 2352-4847. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.08.084>

of vibration time on dust accumulation on PV panels that operate light posts. En línea. *Energy Reports*, vol. 8 (noviembre de 2022), p. 309–318. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.151>

BELLINE, Ramy, Mohamed S. ABD-ELHADY, Hamdy A. KANDIL y Mahmoud M. DAGHER. Numerical investigation of the effect of dust shields on accumulation of dust over PV panels. En línea. *Environmental Science and Pollution Research*, marzo de 2023. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26502-7>

SHI, Huihui y Qiang CHEN. Error-Tracking Iterative Learning Control for the Constrained Flexible-Joint Manipulator with Initial Errors. En línea. *Sustainability*, vol. 14 (septiembre de 2022), n.º 19, pp. 12453. <https://doi.org/10.3390/su141912453>

TRIPATHI, Abhishek Kumar, Mangalpady ARUNA, Elumalai Perumal VENKATESAN, Mohamed ABBAS, Asif AFZAL et al. Quantitative Analysis of Solar Photovoltaic Panel

Performance with Size-Variied Dust Pollutants Deposition Using Different Machine Learning Approaches. En línea. *Molecules*, vol. 27 (noviembre de 2022), n.º 22, pp. 7853. <https://doi.org/10.3390/molecules27227853>

VALLADARES AGUILERA, Javier, et al. Análisis de la influencia del azimut y ángulo de inclinación en centrales fotovoltaicas de Cuba. *Ingeniería Energética*, 2023, vol. 44, no 1, p. 65-72. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012018000300002

VEDULLA, Gowtham; GEETHA, Anbazhagan; SENTHIL, Ramalingam. Review of strategies to mitigate dust deposition on solar photovoltaic systems. *Energies*, 2022, vol. 16, no 1, p. 109. <https://doi.org/10.3390/en16010109>

VODAPALLY, Sai Nikhil; ALI, Mohd Hasan. A comprehensive review of solar photovoltaic (PV) technologies, architecture, and its applications to improved efficiency. *Energies*, 2022, vol. 16, no 1, p. 319. <https://doi.org/10.3390/en16010319>

YOUNIS, A.; ONSA, M. A brief summary of cleaning operations and their effect on the photovoltaic performance in Africa and the Middle East. *Energy Reports*, 2022, vol. 8, p. 2334-2347. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.01.155>

YU, Yue, et al. A review of particle transport and separation by electrostatic traveling wave methods. *Journal of Electrostatics*, 2022, vol. 119, p. 103735. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2022.103735>

ANEXOS

Anexo 1: Operacionalización de variables.

Matriz de Operacionalización de la variable Sistema de control PID				
Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensión	Indicador
Sistema de control PID	Un controlador o regulador PID es un dispositivo que permite controlar un sistema en lazo cerrado para que alcance el estado de salida deseado. El controlador PID está compuesto de tres elementos que proporcionan una acción Proporcional, Integral y Derivativa. Estas tres acciones son las que dan nombre al controlador PID. A.Camarillo (2021).	Un control PID es un mecanismo de control que ofrece la posibilidad de dominar el tiempo de respuesta y aumentar la precisión en la respuesta. Además, es un sistema de ajuste y predicción automático (Sayed, 2020).	Algoritmo de control	Control proporcional (Medición del valor actual en porcentaje) Integral (Periodo de tiempo) Derivativo (Estabilidad contante)
				Número de flujo
			Número de prioridad de riesgo	Exactitud Detectividad -Acumulación de polvo en los paneles solares fotovoltaicos.
				Ocurrencia, Temperatura

Tabla N° 1

Matriz de Operacionalización de la variable Eficiencia de panel solar				
Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensión	Indicador
Eficiencia de panel solar.	La eficiencia de un panel solar se refiere a la capacidad del panel para convertir la energía solar incidente en electricidad utilizable. Se expresa como un porcentaje y representa la relación entre la energía eléctrica generada por el panel y la energía solar (R. Ogbolumani (2022)).	El uso de PID en la limpieza de paneles solares proporciona automatización y control para mejorar la eficiencia del proceso de limpieza con la programación y lógica de control que utiliza el lenguaje de programación de PID para escribir el código que controlará el sistema de limpieza se establece condiciones y algoritmos para determinar cuándo se debe activar la limpieza, cómo se deben mover los cepillos o rastrillos, y cuánta agua se debe utilizar en función de la detección de suciedad y otros parámetros (E. Shenouda (2021)).	Tiempo medio entre fallas y eficiencia	Número de fallas y eficiencia
				Tiempo entre fallas y eficiencia
				Confiability de resultados
			Modos y causas de fallas y eficiencia	Porcentaje de la tasa de falla y eficiencia

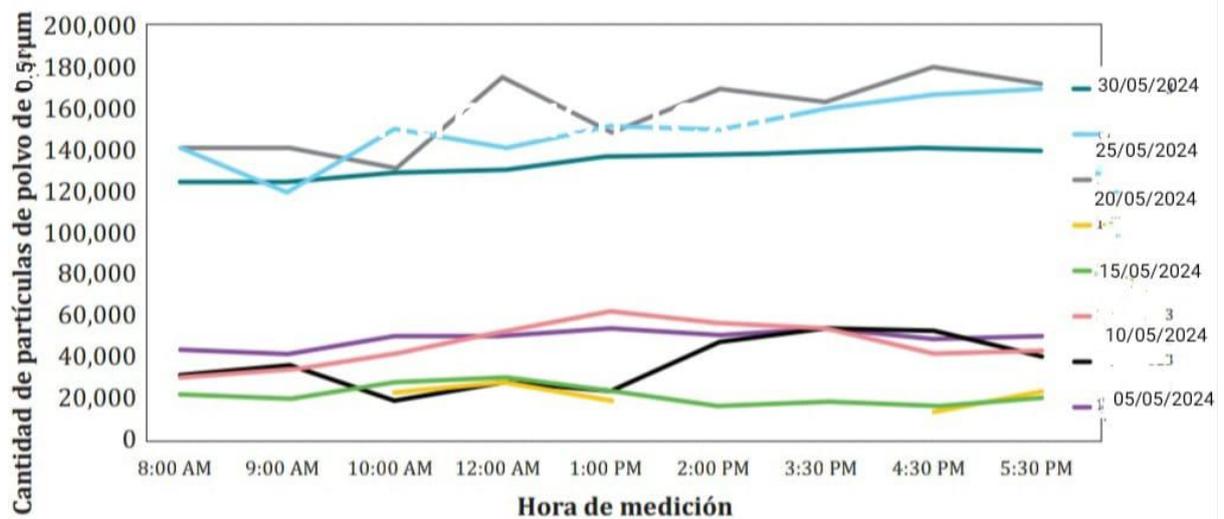
Tabla N° 2

TABLA N°3

Ficha de registro influencia de factores de polvo en los paneles solares fotovoltaicos				
Factor	Grado de la influencia	Estación del año	perdidas	observación
Velocidad del viento				
Humedad				
Concentración de partículas				
Lluvia				
Tormentas de arena				
Tamaño de las partículas				

Tabla 3: ficha de registro de influencia de factores de polvo

Figura 3: Cantidad de partículas de polvo de 0.5 μm en módulo solar de prueba



Medición de acumulación de polvo durante la realización de la tesis

Programación en Arduino del código PID

```
cpp
#include <PID_v1.h>
#include <SD.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_INA219.h>

// Definiciones de pines
const int dustSensorPin = A0;
const int irradianceSensorPin = A1;
const int tempSensorPin = A2;
const int ledControlPin = 2;
const int motorPin1 = 9;
const int motorPin2 = 10;
const int chipSelect = 10;

// Variables para PID
double setPoint = 0; // Valor deseado de polvo (por ejemplo, 0 si queremos aire
limpio)
double input = 0;
double output = 0;

// Parámetros PID
double Kp = 2.0, Ki = 5.0, Kd = 1.0;

// Instancia del PID
PID myPID(&input, &output, &setPoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);

// Instancia del medidor de corriente y voltaje
Adafruit_INA219 ina219;

void setup () {
  pinMode(ledControlPin, OUTPUT);
```

```

pinMode(motorPin1, OUTPUT);
pinMode(motorPin2, OUTPUT);
Serial.begin(9600);
myPID.SetMode(AUTOMATIC); // Configura el PID en modo automático

// Inicialización del medidor de corriente y voltaje
ina219.begin();

// Inicialización del módulo de tarjeta SD
if (!SD.begin(chipSelect)) {
  Serial.println("¡ Error inicializando tarjeta SD!");
  return;
}
Serial.println("Tarjeta SD inicializada.");
}

void loop() {
  // Leer el valor del sensor de polvo
  digitalWrite(ledControlPin, LOW); // Encender LED interno del sensor
  delayMicroseconds(280);
  int sensorValue = analogRead(dustSensorPin);
  delayMicroseconds(40);
  digitalWrite(ledControlPin, HIGH); // Apagar LED interno del sensor
  delayMicroseconds(9680);

  // Convertir el valor leído a concentración de polvo
  input = map(sensorValue, 0, 1023, 0, 500); // Conversión ejemplo, ajustar según
sensor

  // Leer sensores adicionales
  int irradianceValue = analogRead(irradianceSensorPin);
  int tempValue = analogRead(tempSensorPin);
  float shuntvoltage = 0;
  float busvoltage = 0;

```

```
float current_mA = 0;
float loadvoltage = 0;
float power_mW = 0;

shuntvoltage = ina219.getShuntVoltage_mV();
busvoltage = ina219.getBusVoltage_V();
current_mA = ina219.getCurrent_mA();
loadvoltage = busvoltage + (shuntvoltage / 1000);
power_mW = loadvoltage * current_mA;

// Ejecutar el PID
myPID.Compute();

// Controlar el motor en función de la salida del PID
if (output > 0) {
    // Activar motor para limpiar
    digitalWrite(motorPin1, HIGH);
    digitalWrite(motorPin2, LOW);
} else {
    // Detener motor
    digitalWrite(motorPin1, LOW);
    digitalWrite(motorPin2, LOW);
}

// Mostrar y guardar valores en la tarjeta SD
File dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
if (dataFile) {
    dataFile.print("Sensor Value: ");
    dataFile.print(sensorValue);
    dataFile.print(", Dust Concentration: ");
    dataFile.print(input);
    dataFile.print(", PID Output: ");
    dataFile.print(output);
    dataFile.print(", Irradiance: ");
```

```
dataFile.print(irradianceValue);
dataFile.print(", Temperature: ");
dataFile.print(tempValue);
dataFile.print(", Bus Voltage: ");
dataFile.print(busvoltage);
dataFile.print(" V, Shunt Voltage: ");
dataFile.print(shuntvoltage);
dataFile.print(" mV, Load Voltage: ");
dataFile.print(loadvoltage);
dataFile.print(" V, Current: ");
dataFile.print(current_mA);
dataFile.print(" mA, Power: ");
dataFile.print(power_mW);
dataFile.println(" mW");
dataFile.close();
} else {
  Serial.println("Error abriendo datalog.txt");
}

delay(1000); // Esperar un segundo antes de la próxima lectura
}
```