

ANÁLISIS DE LA APLICABILIDAD DE MÉTODOS DE LIMPIEZA DE PANELES FOTOVOLTAICOS PARA SISTEMAS DE GENERACION DISTRIBUIDA EN SUDAMERICA**ANALYSIS OF THE APPLICABILITY OF PHOTOVOLTAIC PANEL CLEANING METHODS FOR DISTRIBUTED GENERATION SYSTEMS IN SOUTH AMERICA****Sergio Llanos, Renán Orellana-Lafuente, Daniel Felipe Sempértégui-Tapia***Laboratorio de Energías Alternativas (LEA)**Universidad Privada Boliviana, Cochabamba - Bolivia**dsempertegui@upb.edu*

(Recibido el 24 de junio de 2024, aceptado para publicación el 12 de agosto 2024)

RESUMEN

En la última década, los paneles solares han emergido como una solución clave para mitigar los efectos del calentamiento global y son, por lo general, la primera opción para diversificar la matriz energética en numerosos países. Además, diversos gobiernos de la región están promoviendo la micro-generación para autoconsumo mediante legislación que regula actividades en Sistemas de Generación Distribuida, los cuales tienden a ser mayoritariamente sistemas fotovoltaicos. No obstante, los sistemas fotovoltaicos presentan ciertos desafíos, entre los cuales destaca la reducción significativa de la producción de energía por el calentamiento excesivo de la superficie del panel y por la acumulación de polvo y suciedad. Para mantener la eficiencia de un panel, debe realizarse una limpieza periódica del sistema, lo cual se complica debido a la ubicación de los paneles en sitios de difícil acceso. En este trabajo, se analiza la aplicabilidad de los diversos métodos de limpieza centrándose en el grado de accesibilidad y su posible aplicación en Sistemas de Generación Distribuida en Sudamérica, considerando que es una tecnología emergente en esta región. Este estudio representa el primer paso hacia la propuesta de un diseño de sistema de limpieza de paneles fotovoltaicos que sea técnica y económicamente viable para su uso en Sistemas de Generación Distribuida en Sudamérica a partir de la experiencia boliviana.

Palabras Clave: Paneles Fovoltáicos, Eficiencia, Métodos de Limpieza, Generación Distribuida.**ABSTRACT**

In the last decade, solar panels have emerged as a key solution to mitigate the effects of global warming and are generally the first option to diversify the energy matrix in many countries. In addition, several governments in the region are promoting micro-generation for self-consumption through legislation regulating activities in Distributed Generation Systems, which tend to be mostly photovoltaic systems. However, photovoltaic systems present certain challenges, including a significant reduction in energy production due to excessive heating of the panel surface and the accumulation of dust and dirt. To maintain the efficiency of a panel, periodic cleaning of the system must be carried out, which is complicated by the location of the panels in hard-to-reach places. In this paper, the applicability of various cleaning methods is analyzed focusing on the degree of accessibility and their possible application in Distributed Generation Systems in South America, considering that it is an emerging technology in this region. This study represents the first step towards the proposal of a technically and economically feasible PV panel cleaning system design for use in Distributed Generation Systems in South America based on the Bolivian experience.

Keywords: Photovoltaic Panels, Efficiency, Cleaning Methods, Distributed Generation.**1. INTRODUCCIÓN**

La creciente adopción de sistemas fotovoltaicos (FV) responde a la urgencia de abordar los desafíos del cambio climático y a la necesidad de diversificar las fuentes de energía para lograr una matriz energética más sostenible y resiliente. En Bolivia, la capacidad instalada del Sistema Interconectado Nacional es de 3778.28 MW, de los cuales el 69.97% proviene de plantas termoeléctricas, el 20.06% de hidroeléctricas y solo el 4.5% de energía solar fotovoltaica [1], inyectada al sistema en Alta Tensión. Esto refleja la alta dependencia de Bolivia a fuentes de energía fósil, como el gas natural, y resalta más aun la necesidad de incrementar el uso de energías renovables en el país, una situación compartida con otros países de la región.

Una alternativa que ha surgido en los últimos años para promover este cambio son los sistemas de Generación Distribuida (GD) con paneles fotovoltaicos, que pueden inyectar energía en media y baja tensión, contribuyendo significativamente a la diversificación de la matriz energética nacional [2]. Varios países de la región (ver [3]), incluida Bolivia, están promoviendo la GD; Bolivia lo hace a través del Decreto N° 4477, que permite la inyección de energía en media tensión de hasta 300 kWp y que en junio 2024 fue ampliado a 500 kWp, mediante el Decreto N° 5167. Esta

iniciativa ha llevado a que algunas empresas privadas opten por instalar sus propios sistemas de generación distribuida para reducir su consumo energético. Ejemplos de ello son el Hotel Rennova, UPB, Club Alemán, Cámara Nacional de Comercio, Ende Transmisión y Banco Bisa [1] [2].

Uno de los principales desafíos que enfrentan los sistemas fotovoltaicos de Generación Distribuida son factores externos a la instalación que afectan su eficiencia, como el sobrecalentamiento del módulo y la acumulación de polvo y suciedad en los paneles, lo cual puede impactar negativamente su rentabilidad. La suciedad, compuesta por polvo, polen, smog, excrementos de aves y otros contaminantes, puede bloquear la luz solar que llega a las células fotovoltaicas, reduciendo así la generación de electricidad. Diversos métodos de limpieza han sido desarrollados para mitigar este problema, incluyendo técnicas manuales, automatizadas, mecánicas y químicas. Cada uno de estos métodos presenta ventajas y desventajas en términos de efectividad, costo, consumo de agua y posibles daños a los paneles. Sin embargo, la mayoría de estos métodos han sido desarrollados y probados en sistemas fotovoltaicos de Alta Tensión y bajo condiciones ambientales y geográficas específicas, lo que podría no ser adecuado para sistemas de Generación Distribuida en las ciudades de la región.

En este contexto, este estudio tiene como objetivo analizar la aplicabilidad de diferentes métodos de limpieza de paneles fotovoltaicos en el contexto de los sistemas de Generación Distribuida, tecnología que va afianzándose en la región como parte de estrategias para diversificar la matriz energética. Considerando el alto potencial de implementación de los Sistemas de Generación en la región, es importante contar con una solución de limpieza local de bajo costo y alta efectividad, para ello se realizó una revisión exhaustiva de la bibliografía existente sobre sistemas de limpieza ([4], [5], [6], [7]), para que en base a la misma en el presente artículo se analice la aplicabilidad de los diferentes métodos utilizados a la realidad regional.

2. EFICIENCIA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

2.1. Curva de Potencia vs Tiempo

La electricidad generada por un panel varía dependiendo de la hora, con su pico de capacidad al mediodía. Para representar los diferentes valores de producción durante el día, se usa una gráfica de Potencia vs Tiempo. La forma usual de esta curva es una campana, cuyo pico se da cuando el sol está en su altitud máxima como indicado en la Figura 1.

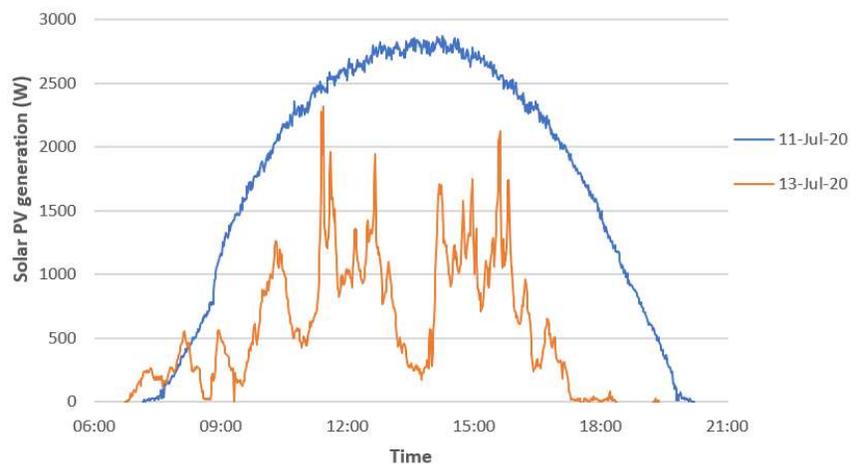


Figura 1: Potencia generada durante un día soleado vs día nublado.

Como se puede observar, existen algunos momentos donde la potencia disminuye considerablemente, usualmente esto es causado por factores externos, como el paso de nubes por el sector. Diferentes tipos de radiación solar (directa, global o difusa) pueden ser medidas por equipos especiales. La información recolectada es útil para calcular factores como la potencia máxima, las horas de producción y la estabilidad.

2.2. Curva de Corriente vs Voltaje

Otro gráfico fundamental para comprender las propiedades de producción de un panel solar es la curva de corriente vs voltaje, Figura 2. Por la naturaleza de los paneles fotovoltaicos, su producción energética está cambiando constantemente; no solo por factores externos como variaciones en la luz, pero también por la variación en el consumo energético (carga variable) en el lado del consumidor.

Hay una gran variedad de métodos para determinar esta curva, sin embargo, la forma más fácil es utilizando una resistencia variable conectada en serie con el panel fotovoltaico, simulando una carga, y midiendo las variaciones de voltaje y corriente. [1]

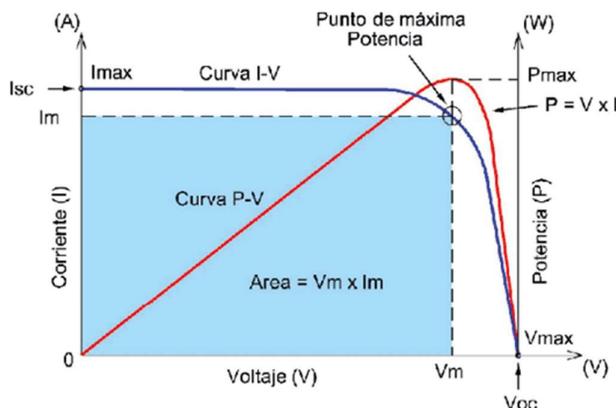


Figura 2: Valores de I vs V y P vs V de una celda solar [8].

Una vez la curva I vs V está definida, la curva de potencia puede ser calculada. Como se puede observar, hay un determinado voltaje donde la corriente cae drásticamente, causando que la potencia generada también decaiga. Por causa de este comportamiento, también hay un instante donde la curva alcanza su punto más alto, este es conocido como el Punto de Máxima Potencia (MPP) y es la condición óptima de funcionamiento para una celda solar.

2.3. Factores que Afectan la Eficiencia

Varios factores pueden modificar la eficiencia de un panel solar, algunos de ellos están relacionados a su construcción, instalación y mantenimiento y otros están relacionados con factores externos como el medio en el que se encuentran.

En relación a los componentes del sistema fotovoltaico algunos factores son las propiedades I – V del panel, el tipo de inversor seleccionado y el almacenamiento en baterías. Los factores que dependen de la construcción de las celdas incluyen el material fotovoltaico, estructura atómica, selección de la banda prohibida, características del cable, ángulo de inclinación, medidas y área superficial de los paneles, discordancia entre las conexiones del panel, problemas con mecanismos de seguimiento solar y rastreadores del punto de máxima potencia. Además, algunos factores dependen del mantenimiento y degradación de las celdas, fracturas en el vidrio y puntos de calor a causa de celdas dañadas.

Por otro lado, las técnicas de fabricación e instalación de los paneles están en constante mejora conforme la tecnología avanza y los componentes son optimizados. Factores externos como la sombra y la radiación solar resultan difíciles de controlar o predecir, ya que son totalmente dependientes del medio ambiente. En cambio, factores como el sobrecalentamiento del módulo y la acumulación de polvo pueden ser controlados con un mantenimiento adecuado.

▪ Sobrecalentamiento de la superficie del módulo

Menos del 20% de la radiación recibida por un panel solar es transformada en energía eléctrica, el resto es calor. Idealmente, a mayor cantidad de luz solar recibida por el panel, mayor cantidad de energía que puede producir; sin embargo, el calor producido por la radiación, combinado con temperaturas ambientales elevadas ocasionan que un panel solar se sobrecaliente.

El calor excesivo tiene un efecto negativo en la producción energética; el voltaje de la celda decrece aproximadamente en una relación de 2.2 mV por cada 1 °C de exceso en relación a su temperatura nominal de operación; por tanto, la eficiencia decae en 0.5% en celdas cristalinas [4] [2]. La Temperatura Normal de Operación del Sistema (NOST) se define como la temperatura del módulo cuando este opera en el punto de máxima potencia, bajo una radiación de 800 W/m² y en una temperatura ambiental de 20 °C. Predecir la pérdida porcentual exacta a causa de incrementos en la temperatura es una tarea difícil a causa de discordancias en el valor NOST, pero en todos los casos la producción energética total se ve afectada [3].

▪ Acumulación de polvo

En cuanto el polvo se acumula sobre la superficie de un panel solar, se forma una capa delgada que disminuye la radiación que alcanza a las celdas fotovoltaicas. Esto ocurre porque las partículas de polvo reflejan la radiación directa devolviéndola hacia la atmósfera o porque absorben esta radiación. Adicionalmente, la presencia de polvo obstruye la disipación térmica ocasionando que el panel se caliente, lo que conlleva a una reducción en la conversión energética.

En la literatura está ampliamente demostrado el efecto que provoca la acumulación del polvo en relación a la eficiencia y generación de los paneles fotovoltaicos. Por ejemplo, Kazem et al. [3] demostraron que la eficiencia de un panel fotovoltaico limpio era de 61.17% comparado al 47% de uno con acumulación de polvo luego de 1 mes bajo situaciones extremas viento en los desiertos de Omán. Ullah et al. [5] también verificaron el descenso de la eficiencia de los paneles por la acumulación de polvo para paneles a diferentes inclinaciones en áreas alrededor del sur de Asia y el Medio Oriente. Dida et al. [9] demostraron que luego de una acumulación de polvo de 4.62 g/m² resultado de 8 semanas de exposición sin limpieza, la potencia máxima disminuía 8.41% comparado a un panel limpio en el desierto del Sahara en Argelia. Por tanto, esta acumulación de polvo sobre los paneles tiene particular importancia y está demostrado por varios autores especialmente en países que poseen sistemas fotovoltaicos de gran magnitud en sectores desérticos. Sin embargo, no existen estudios mostrando los porcentajes de disminución de la eficiencia en instalaciones de micro-generación en ambientes más urbanos y en sistemas de generación distribuida.

Por tanto, es importante estudiar sobre los diferentes factores que afectan la acumulación de polvo en un panel solar. Según Wan et al. [6] dentro de estos están los factores ambientales (como la lluvia, humedad, temperatura ambiental, velocidad y dirección del viento), características del tipo de polvo (tamaño, carga estática, concentración en el aire) y factores propios del panel (como el tipo de instalación, ángulo de inclinación y materiales de la superficie), como ilustrado en la Figura 3.

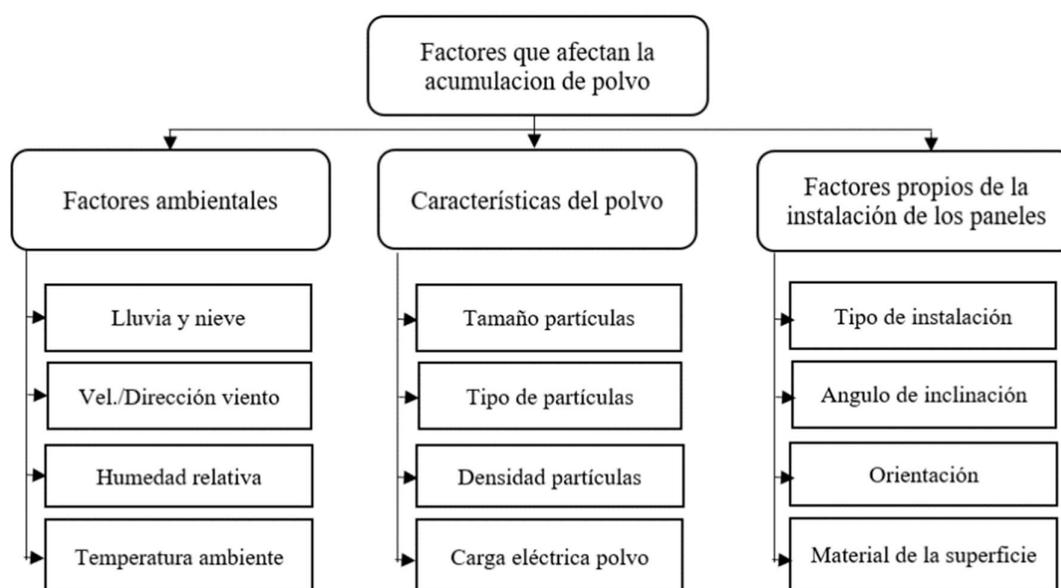


Figura 3: Factores que afecta la deposición de polvo en paneles solares, adaptado de [6].

Como consecuencia, la predisposición de un panel a la acumulación de polvo está relacionada directamente con la región en que se encuentra. Diferentes lugares presentan diferentes características climáticas y tipos de polvo; pero de manera general se sugiere instalar los módulos con una inclinación apropiada, evitar sitios de mucha humedad como costas y limpiar el panel luego de lluvias suaves ya que estas facilitan la adherencia de partículas. Además, vale mencionar también, que para instalaciones de micro-generación en zonas urbanas es importante identificar otros factores externos que podrían afectar la acumulación de polvo o suciedad en general en los paneles fotovoltaicos. Entre estos factores se encuentran el smog generado en las ciudades que representa características totalmente diferentes de partículas/cenizas de adhesión y tamaño, hojas secas de árboles, basura en general, desechos de construcciones cercanas, mayor cantidad de insectos comparados a zonas desérticas, entre otros. En la literatura, no hay estudios sobre estos factores de acumulación de polvo/suciedad en sistemas de generación de autoconsumo y micro-generación, por lo menos según conocimiento de los autores de este trabajo.

3. MÉTODOS DE LIMPIEZA

Como se mencionó anteriormente, la mejor manera para que un usuario incremente la eficiencia del panel solar es seguir un plan de mantenimiento y limpieza que mantenga al equipo en condiciones óptimas. Hay varias formas de conseguir esto, aquellos sistemas que utilizan energía eléctrica para limpiar se denominan métodos activos; aquellos que no requieren electricidad se denominan métodos pasivos.

3.1 Métodos Pasivos

▪ Limpieza manual

Por lo general, para que la limpieza manual sea efectiva en eliminar el polvo acumulado, se necesita una gran cantidad de agua y herramientas como gomas, trapos y cepillos entre otros [7][10]. En pequeña escala, por ejemplo, en la instalación de una casa, la tarea de limpieza está a cargo del usuario. Por otro lado, para aplicaciones mayores como una planta fotovoltaica, la limpieza es parte de la rutina de los operadores. En ambos casos el proceso de limpieza requiere tener los conocimientos y herramientas correctas para realizar la labor sin dañar los paneles [11]. Asimismo, puesto que los paneles en muchos casos están ubicados en techos o grandes alturas, la tarea implica el riesgo de caída. Además, ya que se trata de una tarea periódica, este método demanda una cantidad considerable de tiempo de los operadores o usuarios particulares.

Una limpieza manual correcta es capaz de renovar el panel a su mejor condición posible, por tanto, este proceso cuenta con los mejores resultados en cuanto al retorno de la eficiencia. No obstante, este método conlleva el mayor riesgo para la seguridad y es el que más tiempo demanda.

▪ Recubrimientos auto-limpiantes

Inspirados en las hojas de las plantas de loto, los recubrimientos auto-limpiantes consisten en capas delgadas que presentan baja humectabilidad y alta transparencia. El objetivo es crear un material que pueda ser limpiado fácilmente por una corriente natural de agua, como la lluvia. A grandes rasgos, estas superficies se dividen en dos grupos: superficies hidrófilas y superficies hidrófobas.

Las superficies hidrófilas esparcen las gotas de agua sobre la superficie y forman una capa de agua. Durante el esparcimiento, los contaminantes son arrastrados. Este método ha sido comprobado por varios autores [12] [13] [14] [15] [16], quienes reportaron que minimiza la acumulación de polvo y mejora la eficiencia total del sistema fotovoltaico. Por otra parte, las superficies hidrófobas cuentan con propiedades repelentes al agua y de baja adherencia que ocasionan que las gotas de agua se deslicen fuera de la superficie rápidamente, llevándose los contaminantes consigo. Este efecto vuelve al recubrimiento efectivo especialmente en lugares con fuertes lluvias [17] y ha demostrado mejorar el rendimiento general del sistema fotovoltaico por varios autores [18] [19] [20] [21]. La Figura 4 muestra una ilustración de las diferencias entre los dos tipos de recubrimientos auto-limpiantes.

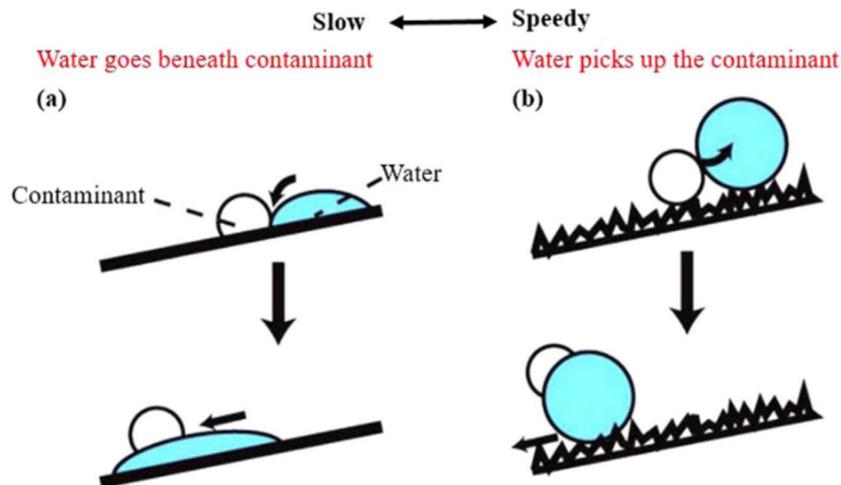


Figura 4: Superficies hidrófilas e hidrófobas [22].

Para aplicaciones prácticas, el recubrimiento deberá tener resistencia mecánica contra la abrasión, cizallamiento y hielo. El comportamiento y durabilidad de las capas de recubrimiento depende de la composición química de su material y la aspereza de su superficie. Existen varias formas de preparar superficies auto – limpiantes, entre ellos están la preparación basada en solventes, el método asistido por vapor, capas de polvo seco y polimerización [4].

Algunas limitaciones de las capas auto – limpiantes son el desgaste mecánico y la abrasión por impacto de arena; estos factores deben tenerse en cuenta, ya que pueden reducir la rugosidad microscópica y con ello perder parte de la función del recubrimiento. El costo de los materiales involucrados en la manufactura también es una barrera para una fabricación a mayor escala.

3.2 Métodos Activos

▪ Sistema de limpieza con rociador de agua

Una técnica de limpieza muy utilizada es el flujo de agua forzada. Por lo general, este método implica un depósito de agua, una bomba y un sistema hidráulico, el cual proporciona agua a presión. Algunos autores, como Moharram et al. [23], Ekinci et al. [24] y Kazem y Chaichan [25] utilizan agentes de limpieza en el agua para mejorar los resultados. Además, esta técnica ayuda a enfriar el panel, lo que también ayuda contra el sobrecalentamiento, que es un factor que reduce la eficiencia del sistema fotovoltaico.

Existen diferentes tipos de configuraciones para esta técnica de limpieza, la Figura 5 muestra el esquema de una técnica de limpieza basada en agua pulverizada propuesta por Alghandi et al. [26], que introduce la recuperación de agua para reducir la demanda de agua y proponen un sistema completo que aumenta la efectividad de los paneles solares en un 27%.



Figura 5: Sistema de rociador de agua propuesto por [26].

También es importante mencionar que existen algunas soluciones comerciales, como Heliotex [27], la cual trata de pulverizadores de agua automatizados que limpian periódicamente grupos de paneles. La principal ventaja de este diseño es que, una vez instalado, no requiere intervención adicional del usuario, más allá de recargar el suministro de jabón concentrado y revisar ocasionalmente el filtro de agua. La instalación se puede realizar para diferentes tamaños de paneles, independientemente del número de paneles que haya en una misma disposición. Los rociadores de agua están unidos a cada panel y están conectados a la fuente de agua disponible. El sistema ofrece un control sobre los tiempos de enjuague y limpieza. El ciclo del proceso de limpieza sugerido es una vez cada 1 o 2 semanas, y un enjuague cada 2 o 3 días para evitar la acumulación de polvo o suciedad. Este método de limpieza ayuda a mantener la vida útil del panel, debido a que no aplica una fuerza mecánica directa sobre el mismo. Dado que los paneles solares son solo capas delgadas de material cristalino, tienden a ser muy frágiles; con el sistema de pulverización se reduce el riesgo de rayones e incluso roturas. Además, la empresa Heliotex indica que su mezcla de concentrado de jabón es biodegradable y no presenta peligro de corrosión para los paneles [27]. Este método es eficaz para eliminar polvo y partículas pequeñas; sin embargo, partículas más grandes serían difíciles de eliminar solo con agua pura.

Por otro lado, los equipos de Kärcher [28], iSolar 400 e iSolar 800; son cepillos giratorios circulares que mejoran enormemente la limpieza manual de paneles solares, tradicionalmente realizada con cepillos o escobillas. iSolar utiliza un limpiador de agua de alta presión (con agua caliente y fría), combinado con el sistema de descalcificación de agua de Kärcher. Según el modelo, estas características están integradas en uno o dos cepillos giratorios, Figura 6, con cerdas de nylon para garantizar una limpieza completa y sin rayones. Los cepillos están conectados a una varilla telescópica, con un alcance de hasta 15 m, capaz de llegar a lugares distantes de forma segura.

La versión más pequeña, iSolar 400, es más apropiada para instalaciones fotovoltaicas pequeñas y medianas. El disco tiene un ancho de trabajo de 400 mm, lo que lo hace compacto, ligero y fácil de manejar. Por otro lado, iSolar 800 está compuesto por dos cepillos de discos contra – rotativos, unidos por una junta articulada que permite ángulos de trabajo flexibles. Debido al efecto contra – rotativo, las fuerzas transversales se anulan; causando que su manipulación sea más estable y óptima para instalaciones de mayor tamaño.

La principal ventaja de este método es su flexibilidad. Con el tubo telescópico de gran alcance, el cepillo puede alcanzar los paneles solares prácticamente en cualquier posición instalada. Además, Kärcher es conocido por sus pulverizadores de agua de alto rendimiento, lo que significa que el sistema garantiza buenos estándares de limpieza. No obstante, este

proceso de limpieza aún debe ser realizado manualmente por un operador a una gran altura, por lo que implica un costo de la mano de obra y riesgo de caídas (aunque ambas son menores que en un proceso tradicional de limpieza manual).



Figura 6: Karcher iSolar 400 (arriba) y 800 (abajo) [28].

Por otro lado, también existen sistemas de limpieza basados en flujo forzado de agua, pero que también involucran algún mecanismo automático de limpieza mediante motores. Por ejemplo, Sugiarta et al. [29] desarrollaron un sistema completo de limpieza de paneles que involucra un mecanismo de movimiento del limpiador basado en un controlador de motor de 12-24 V CC, un marco de montaje y un sistema de suministro de agua con boquilla rociadora. La velocidad del motor es controlada por un modulador de ancho de pulso y el sentido de dirección de rotación se define mediante dos pulsadores manuales. El esquema de este sistema está ilustrado en la Figura 7.

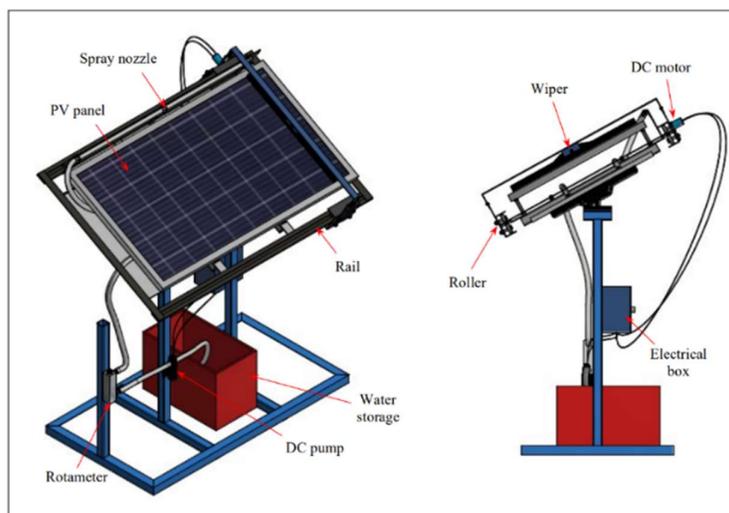


Figura 7: Rodillo y esquema del circuito de agua [29].

Este sistema de agua está compuesto por una bomba de 12 V CC con caudal de 4 litros por minuto, un tanque de almacenamiento de agua de 10 litros de capacidad, tres boquillas rociadoras y una tubería de plástico flexible de 3/8" de diámetro. Debido al diseño al aire libre del tanque, parte del flujo de agua pulverizada circula de regreso al almacenamiento. El sistema se basa en ciclos de barrido con el limpiador. Con repeticiones de 10, 20 y 30 veces el rendimiento del panel retorna al 57%, 79,1% y 86,7% de la condición inicial de superficie limpia, respectivamente. Este diseño combina los beneficios de utilizar agua para eliminar los contaminantes superficiales ligeros, con un sistema mecánico más rígido para limpiar las suciedades.

▪ Sistema de aire forzado

Otro sistema de limpieza es la aplicación de un flujo de aire comprimido para la eliminación del polvo. Este método se utiliza especialmente en lugares con escasez de agua como desiertos, que resultan ser lugares comunes para instalar los sistemas fotovoltaicos. Du et al. [30] propusieron una boquilla de expansión de múltiples etapas para diferentes condiciones ambientales. La Figura 8 ilustra el esquema del sistema de limpieza de aire comprimido utilizado por estos autores. El sistema incluye un tanque de aire comprimido, un compresor, una válvula de regulación y boquillas multietapa. Du et al. [30] demostraron la viabilidad de la eliminación de polvo de paneles solares utilizando flujos de aire turbulentos.

Sistemas de aire comprimido parecidos fueron propuestos por otros autores como [31] y [32].

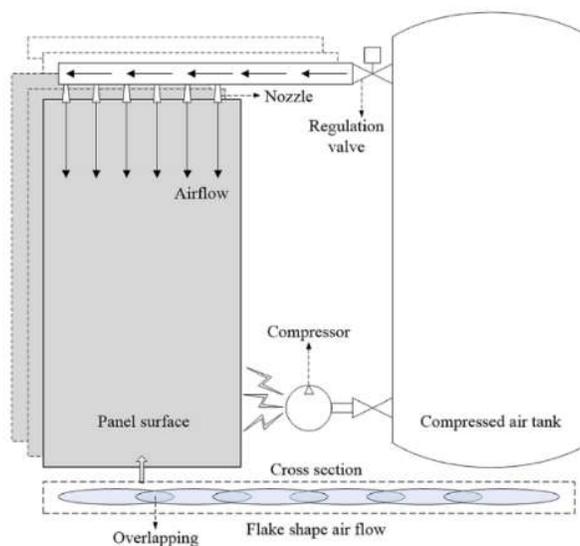


Figura 8: Sistema de aire forzado propuesto por [30].

▪ Limpieza ultrasónica

Para limpiar piezas muy contaminadas se puede utilizar el principio de cavitación. La cavitación es un efecto hidrodinámico que se produce cuando las ondas ultrasónicas crean pequeñas burbujas en un líquido debido a cambios rápidos de presión. Cuando las burbujas creadas colapsan, se crean cavidades de vapor dentro del agua, la energía liberada de esta manera genera fuerzas que limpian eficazmente la superficie y eliminan los contaminantes. Para crear cavitación en grandes volúmenes se necesita una cantidad considerable de energía; sin embargo, para limpiar superficies planas basta con producir vibraciones en una fina capa de agua sobre la superficie.

Este efecto es aprovechado por la limpieza ultrasónica, en el cual se adhiere un vibrador piezoeléctrico, Figura 9, a dos placas largas unidas a cada lado; como resultado, se crean vibraciones longitudinales, produciendo cavitación en una fina capa líquida de fluido entre ellas [8]. La resonancia y los modos óptimos de vibración dependen del material, del espesor de la capa de agua, de la uniformidad y de la forma de la placa entre otros factores.



Figura 9: Componente de la limpieza ultrasónica [8].

Un inconveniente del sistema ultrasónico es que, requiere tener una gruesa capa de agua entre las placas, condición que solo se puede alcanzar durante la lluvia o con un flujo de agua lo suficientemente fuerte. Las simulaciones muestran que, si la capa de agua es demasiado fina, el efecto de limpieza no es óptimo en la zona alejada en medio de las placas [8]. Por lo tanto, este sistema necesita una fuente externa de agua o funcionar bajo una fuerte lluvia.

▪ Actuador piezoeléctrico

El movimiento del actuador piezoeléctrico lineal se basa en dos vibradores montados sobre rieles lineales. Ambos vibradores crean movimientos elípticos simétricos, que obligan a un actuador adjunto a moverse linealmente a lo largo de la dirección de las guías. Una escobilla es movida por el actuador para limpiar el polvo de la superficie del panel. Las características de vibración se pueden configurar para modificar las frecuencias y las curvas de velocidad – carga para la conducción de frente y de reversa [33]. La Figura 10 ilustra el antes y después de un proceso de limpieza con este proceso.

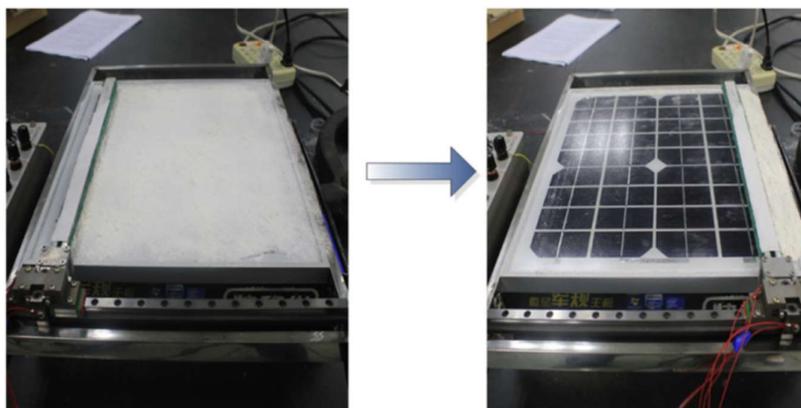


Figura 10: Limpieza hecha por el actuador piezoeléctrico [33].

Este método, es eficiente desde el punto de vista energético, especialmente cuando la capa de polvo sobre el área activa, es lo suficientemente gruesa. Todo el sistema es ligero y tiene una estructura compacta, siendo capaz de realizar la limpieza sin necesidad de fuente de agua.

Dado que la configuración de vibración se establece en un panel estándar con un área activa determinada, es necesario realizar modificaciones adicionales para otros tamaños de paneles. Por ejemplo, las líneas guía deben fijarse al marco del panel solar, por tanto, el tamaño del actuador también debe ajustarse para diferentes modelos.

▪ Método de limpieza basado en robots

Existen varios métodos de limpieza basados en robots [34] [6]. Uno de ellos es un cepillo giratorio [35] acoplado a un robot tipo coche, que se mueve con motores de corriente continua (ver Figura 11). El sistema de irrigadores es controlado por un microcontrolador y tiene una cámara en la frente del robot para registrar el estado de la superficie y mostrar el estado de limpieza. Para controlar la dirección del movimiento, las ruedas se ubican sobre un carril estático; la maniobrabilidad se limita a movimientos hacia adelante y hacia atrás a lo largo del carril. La función de la cámara es monitorear la operación de limpieza. Está conectado a internet para enviar un mensaje de notificación por SMS a los operadores cuando la densidad del polvo es considerable. La cámara también se puede utilizar para capturar vídeos e imágenes durante la limpieza. Para ayudar a monitorear el proceso, valores como el voltaje actual, la carga de la batería y la cantidad de polvo se muestran en una aplicación interactiva que utiliza un módulo Wi-Fi. Los datos recopilados se documentan y almacenan en un archivo.



Figura 11: Operación del robot con cepillo [35].

Los experimentos realizados mostraron un aumento de la tasa de eficiencia del 35% al 94,95% [35]. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la versión de este robot aún no es para uso comercial. El robot propuesto opera para un pequeño panel solar y en un ambiente controlado; ampliar esta versión a un tamaño estándar requeriría adaptaciones adicionales. Además, exponer este robot al aire libre traería nuevos problemas relacionados con el trabajo bajo condiciones ambientales.

Otro ejemplo de sistemas de limpieza basados en robots es el omni-robot [22]. Este robot está diseñado para ser utilizado en paneles instalados en techos, para limpieza automática y autónoma. El movimiento se realiza mediante cuatro ruedas omnidireccionales que pueden realizar un giro típico o desplazarse lateralmente utilizando rodillos. Las ruedas están accionadas por motores de 12 V. Para evitar caídas del robot desde el panel, el mismo cuenta con foto-sensores ubicados en los cuatro lados de la carcasa principal. Dos baterías alimentan tanto el control como los motores y se pueden utilizar para realizar la limpieza durante 30 minutos. Un registro fotográfico de este robot para limpieza de paneles puede ser observado en la Figura 12.

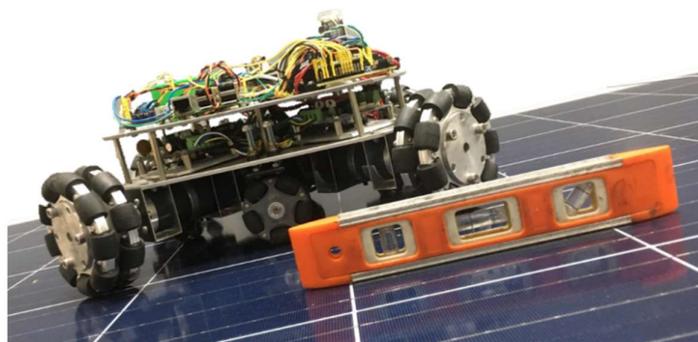


Figura 12: Robot omni-direccional sobre un panel solar inclinado [22].

Este robot es capaz de moverse en planos inclinados hasta un ángulo de 10° . La velocidad no es completamente uniforme en todos los casos, a causa de que las ruedas resbalan. Sin embargo, los errores de posición son aproximadamente del 1%, lo que es aceptable para aplicaciones de limpieza. La arquitectura omnidireccional permite que el robot pierda menos tiempo dando vueltas, lo que resulta en un movimiento entre un 50 y un 60% más rápido que con ruedas convencionales que se mueven a la misma velocidad [22].

Para corregir el problema del patinaje de las ruedas, es necesario realizar estudios adicionales; por ejemplo, se propone usar un material de alta fricción para acoplar a las ruedas. Además, la limpieza en este sistema está diseñada para realizarse con cepillos en los cuatro lados de la carcasa principal.

▪ Drones

Empresas como Drone Sky Cleaners o Dalmar utilizan drones para realizar procedimientos de limpieza en grandes alturas, como por ejemplo en ventanas de edificios, cúpulas, tejados y aparcamientos; Dalmar también ha empezado a utilizarlos para limpiar paneles solares [36]. Existe una gran variedad de modelos y diseños para la limpieza con drones, con técnicas que van desde imanes de neodimio, correas, hélices y hexacópteros [37] como el ilustrado en la Figura 13. Los drones también son capaces de utilizar una cámara para detectar el nivel de suciedad sobre la superficie del panel [38].



Figura 13: Proceso de limpieza por un dron comercial [36].

En el caso de Drone Sky Cleaners, el dron es un hexacóptero que utiliza un cepillo para fregar la superficie de la ventana/panel, un chorro de agua para enjuagar los escombros y algunos productos químicos amigables con el medio ambiente para casos que requieran limpieza profunda. Algunos de sus drones también incluyen una cámara para proporcionar fotos o vídeos de antes y después, como prueba de la eficiencia real del método.

Este tipo de sistema funciona particularmente bien con áreas de limpieza grandes. El uso de un dron reduce el tiempo y la cantidad de trabajadores necesarios para la tarea. La seguridad operativa aumenta considerablemente; ya que, al controlar el proceso desde el suelo, el riesgo de trabajo en altitud desaparece. Como medida extra, durante la operación de limpieza se acordona el área alrededor del sitio de limpieza para proteger a los transeúntes. Asimismo, se siguen protocolos de seguridad para evitar accidentes durante el aterrizaje.

Los drones modernos cuentan con tecnologías avanzadas de estabilización, control y esquite de obstáculos; sin embargo, todavía son dependientes de las condiciones climáticas. En casos de fuertes vientos, lluvia o nieve, el vuelo puede verse gravemente afectado provocando posibles daños al equipo. Otra desventaja es que el operador debe estar familiarizado con el control de movimiento del dron, dado que tanto los paneles como los drones son elementos caros y frágiles, cualquier tipo de colisión puede resultar costosa.

4. DISCUSIÓN

La TABLA 1 presenta un análisis completo sobre las ventajas, desventajas y sobre el posible uso de cada método de limpieza en Sistemas de Generación Distribuida.

TABLA 1 - ANÁLISIS DE LOS MÉTODOS DE LIMPIEZA ENFOCADO EN SU POSIBLE USO EN SISTEMAS DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA

| <i>Ventajas</i> | <i>Desventajas</i> | <i>Posible uso en Sistemas GD</i> |
|--|--|---|
| MÉTODO: Limpieza manual | | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Devuelve el panel solar a su máxima eficiencia posible. | <ul style="list-style-type: none"> • Riesgo de caída de altura • Costoso en horas de trabajo • Requiere equipamiento y capacitación especial | Considerando la gran variedad de posibles usuarios de la micro-generación, no resulta viable creer que todos los usuarios tendrán la capacidad de realizar una limpieza manual. |
| MÉTODO: Revestimientos auto – limpiantes [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] [20] [21] | | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Limpieza solo con una corriente natural de agua. • Incrementa la resistencia mecánica del panel. • Minimiza la acumulación de polvo. | <ul style="list-style-type: none"> • Tiempo de vida limitado • Pierde su funcionamiento si trabaja en ambientes abrasivos como vientos con arena • Requiere equipamiento especial para su producción | Podría ser efectivo en zonas urbanas con poca lluvia, pero en la región se encuentran gran cantidad de ciudades con precipitaciones medias o elevadas. Además, su tiempo de vida limitado lo hace inviable técnica y económicamente. |
| MÉTODO: Sistemas con agua forzada [23] [24] [25] [26] [39] [28] [29] | | |
| <p>Depende del tipo de sistema, pero en general:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ciclos de limpieza configurables. • Sistema independiente, según el modelo no requiere intervención del usuario. • Puede ser instalado en paneles con cualquier disposición. • Sistema flexible y adaptable. • Buen rendimiento. • Puede combinar ventajas de limpieza con agua y limpieza mecánica. | <p>Depende del tipo de sistema y estudio específico, pero en general:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se dificulta la limpieza de contaminantes con partículas de gran tamaño. • Dependiendo del modelo, requiere operación manual de principio a fin de proceso. • Puede llegar a requerir varios ciclos para funcionar de forma efectiva en la limpieza. | Dependiendo de la configuración escogida o diseñada, un sistema de limpieza basado en el flujo o roció de agua con mecanismos de recuperación de agua, filtraje y automatización si podría llegar a ser un potencial método para sistemas GD, pero se requiere una investigación más profunda para determinar el modelo específico ideal técnica y económicamente. |
| MÉTODO: Limpieza con aire forzado [30] [31] [32] | | |
| <ul style="list-style-type: none"> • No dependen de la disponibilidad de agua. • QUITAN el polvo de manera efectiva. • Adecuado para regiones áridas o semi-áridas. | <ul style="list-style-type: none"> • Requiere de un compresor. • Energía consumida por el compresor • La eficiencia del sistema fotovoltaico se reduce a causa del sistema de compresión | Dado que los sistemas de GD están enfocados en autoconsumo y venta de energía, el requerimiento de energía de parte de un compresor disminuye la energía producida por el sistema. |
| MÉTODO: Limpieza ultrasónica [8] | | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Puede limpiar piezas fuertemente contaminadas. • Rápido y eficiente si opera en condiciones adecuadas. | <ul style="list-style-type: none"> • Riesgo de dañar la superficie del panel con el tiempo. • Requiere un fuerte flujo de agua para funcionar. | Requiere de condiciones especiales para su adecuado funcionamiento, hecho que no siempre se dará en los sistemas de GD en zonas urbanas. |
| MÉTODO: Actuador piezoeléctrico [33] | | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Relación velocidad-carga configurable • Efectivo con capas gruesas de polvo | <ul style="list-style-type: none"> • La longitud del actuador debe ser adaptada para diferentes tamaños de paneles. • Costo. | Esta tecnología requiere mayor investigación para determinar si sería viable su uso en sistemas GD, por ahora es un sistema bastante caro. |
| MÉTODO: Limpieza basado en robots [35] [22] | | |
| <p>Depende del tipo de robot y estudio específico, pero en general:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Amplio rango de control automatizado. • Detecta y alerta cuando se requiere limpieza. • Monitorea el proceso. • Puede controlar su desplazamiento de forma precisa en ángulos inclinados. • Más rápido al tomar las curvas • Detecta los bordes del módulo para evitar caídas | <p>Depende del tipo de robot y estudio específico, pero en general:</p> <ul style="list-style-type: none"> • El modelo con escobilla no funciona en paneles de tamaño estándar • No está probado para funcionar al aire libre • El modelo con escobilla solo puede moverse adelante y atrás. • Las ruedas pueden patinar, según el modelo. • La recarga debe hacerse manualmente. | Costoso para sistemas de micro-generación ya que ofrece servicios como monitoreo y detección automática de acumulación de polvo que probablemente no son necesarios en sistemas urbanos de GD. Además, no hay un modelo comercial utilizable y adecuado a diferentes características de la instalación de paneles (ángulo de inclinación, disposición de los paneles) y no están capacitados para trabajar al aire libre. |
| MÉTODO: Drones [36] [37] [38] | | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Reduce el tiempo de trabajo y el número operadores necesarios • Entrega fotos y videos de antes y después de limpieza • Proceso altamente seguro. | <ul style="list-style-type: none"> • Depende de las condiciones climáticas. • Requiere capacitación especial para operarlo. | Ídem al método de limpieza basado en robots. |

Como se puede observar en la Tabla 1, factores como: el principio de funcionamiento, los insumos y herramientas necesarias, la necesidad de asistencia del usuario y la capacidad de configuración hacen que cada método de limpieza sea eficaz para resolver una necesidad particular, pero al mismo tiempo puede presentar falencias en otros aspectos. Por ejemplo, algunos de los métodos analizados pueden limpiar contaminantes severos si trabajan en condiciones de lluvia, otros se especializan en realizar un proceso de limpieza en seco. Ideal para lugares con escasez de agua. Por ello, se puede afirmar que no existe una solución universal; la selección del método de limpieza más apropiado se debe adaptar a las características del sistema fotovoltaico, a tipo de suciedad que afecta a la producción de los paneles fotovoltaicos, a las restricciones impuestas por el lugar de instalación, a la disponibilidad de agua en el lugar, pero fundamentalmente a la disponibilidad de recursos económicos para implementar el sistema de limpieza.

En el caso específico de los sistemas de GD, que normalmente son instalados en áreas urbanas, sobre techos o en terrazas, en el primer caso con dificultades de acceso y con inclinación igual a la del techo, con potencias que pueden llegar hasta los 500 kWp y con áreas de panel de aproximadamente 3000 m² y con material contaminante compuesto por polvo y/o smog, emplear robots, actuadores piezoeléctricos o ultrasónicos, pueden no ser los más viables, en cambios, la limpieza con chorro de agua (directo o mediante drones) puede ser más efectivo, además de presentar la ventaja de que el agua utilizada puede ser reciclada.

Por otro lado, en los sistemas de GD instalados en terrazas o en el suelo, estos normalmente se instalan en filas, con ángulos de inclinación, normalmente entre la latitud del lugar y la latitud más 10°, la utilización de métodos como los robots, actuadores piezoeléctricos o ultrasónicos, se ven dificultados por el salto que se debe realizar entre las diferentes filas, por ello, al igual que en las instalaciones sobre techo, los métodos más apropiados son los de chorro de agua directo o mediante drones.

Por otro lado, el análisis de la profundidad y frecuencia de limpieza requerida hace referencia al grado de contaminación que presentan los paneles y qué tan fuerte debe ser el proceso de limpieza para restaurarlos a condiciones óptimas. En los casos donde el panel está relativamente bien protegido, por ejemplo, en el techo de un edificio, la contaminación usualmente es causada principalmente a causa de polvo; por lo tanto, un proceso de limpieza ligero (como los rociadores de agua) podría ser suficiente. Por otro lado, en los casos donde el panel esté expuesto a contaminantes difíciles de eliminar, como barro, excrementos de aves, arena entre otros; se requiere un proceso de limpieza más fuerte, de lo contrario el efecto no será suficiente.

Conocer el tipo de contaminante ayuda a determinar qué herramientas y sustancias son más efectivas al momento de limpiar; y el tipo de protección que requiere el panel. Si entre los contaminantes hay elementos duros (como arena o barro, por ejemplo), un dispositivo giratorio (como un cepillo con motor) puede dañarse. Asimismo, la abrasión daña la superficie del panel; analizar los contaminantes que impactan en la superficie ayuda a determinar el tipo de protección necesaria, de esta manera se puede mitigar el efecto y aumentar la vida útil del panel.

Muchos dispositivos de limpieza automatizados, basados en el monitoreo y comparación del nivel de radiación existente sobre la superficie del panel y la energía producida por este, pueden configurar la frecuencia con la que se realizará la limpieza. Por ello, es importante definir el punto crítico en el que la eficiencia (o la cantidad de energía que se ha dejado de producir) es lo suficientemente baja como para requerir de limpieza.

5. CONCLUSIONES

Diferentes tipos de métodos de limpieza fueron presentados, cada uno con un principio de funcionamiento particular, ventajas y desventajas. Posteriormente se analizó la viabilidad de uso de cada método en sistemas de Generación Distribuida.

Se llegó a la conclusión que un sistema de limpieza basado en el flujo o rocío de agua con mecanismos de recuperación de agua, filtraje y automatización si podría llegar a ser un potencial método para sistemas GD, pero se requiere una investigación más profunda para determinar el modelo específico ideal técnica y económicamente teniendo en cuenta variables como: profundidad de la limpieza, tipo de contaminantes, frecuencia de limpieza identificada, recursos disponibles, lugar y número de instalación, tamaño y forma de la disposición del panel, tipo de polvo y suciedad. El estudio de estas variables permitirá crear un diseño de limpieza más preciso que se ajuste mejor a las condiciones de operación y a las necesidades del usuario en un sistema de GD.

REFERENCIAS

- [1] AETN, “Anuario Estadístico 2022,” 2022. [Online]. Available: [https://sawi.aetn.gob.bo/docfly/app/webroot/uploads/Libro Anuario AETN 2022 - tapas-nramirez-2023-05-09-a.pdf](https://sawi.aetn.gob.bo/docfly/app/webroot/uploads/Libro_Anuario_AETN_2022_-_tapas-nramirez-2023-05-09-a.pdf).
- [2] D. R. Alcócer-Ayala, Y. Pozo Vallejo, D. F. Sempértegui-Tapia, and R. Orellana Lafuente, “Caso De Estudio:

- Impacto De La Generación Distribuida En Redes Eléctricas De Distribución,” *Investig. Desarro.*, vol. 23, no. 1, pp. 57–66, 2023, doi: 10.23881/idupbo.023.1-4i.
- [3] L. Chabla-Auqui, D. Ochoa-Correa, E. Villa-Ávila, and P. Astudillo-Salinas, “Distributed Generation Applied to Residential Self-Supply in South America in the Decade 2013–2023: A Literature Review,” *Energies*, vol. 16, no. 17, 2023, doi: 10.3390/en16176207.
- [4] J. Siecker, K. Kusakana, and B. P. Numbi, “A review of solar photovoltaic systems cooling technologies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 79, pp. 192–203, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.053>.
- [5] A. Ullah, A. Amin, T. Haider, M. Saleem, and N. Z. Butt, “Investigation of soiling effects, dust chemistry and optimum cleaning schedule for PV modules in Lahore, Pakistan,” *Renew. Energy*, vol. 150, pp. 456–468, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.090>.
- [6] L. Wan, L. Zhao, W. Xu, F. Guo, and X. Jiang, “Dust deposition on the photovoltaic panel: A comprehensive survey on mechanisms, effects, mathematical modeling, cleaning methods, and monitoring systems,” *Sol. Energy*, vol. 268, no. January, p. 112300, 2024, doi: 10.1016/j.solener.2023.112300.
- [7] H. A. Kazem, M. T. Chaichan, A. H. A. Al-Waeli, and K. Sopian, “A review of dust accumulation and cleaning methods for solar photovoltaic systems,” *J. Clean. Prod.*, vol. 276, p. 123187, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123187>.
- [8] P. Vasiljev, S. Borodinas, R. Bareikis, and A. Struckas, “Ultrasonic system for solar panel cleaning,” *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 200, no. November 2018, pp. 74–78, 2013, doi: 10.1016/j.sna.2013.01.009.
- [9] M. Dida, S. Boughali, D. Bechki, and H. Bouguettaia, “Output power loss of crystalline silicon photovoltaic modules due to dust accumulation in Saharan environment,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 124, p. 109787, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109787>.
- [10] W. J. Jamil, H. Abdul Rahman, S. Shaari, and Z. Salam, “Performance degradation of photovoltaic power system: Review on mitigation methods,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, pp. 876–891, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.072>.
- [11] H. Abuzaid, M. Awad, and A. Shamayleh, “Impact of dust accumulation on photovoltaic panels: a review paper,” *Int. J. Sustain. Eng.*, vol. 15, no. 1, pp. 266–287, 2022, doi: 10.1080/19397038.2022.2140222.
- [12] L. L. Kazmerski *et al.*, “Fundamental studies of the adhesion of dust to PV module chemical and physical relationships at the microscale,” in *2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 2015, pp. 1–7, doi: 10.1109/PVSC.2015.7356135.
- [13] H. Lu and C. Zheng, “Comparison of Dust Deposition Reduction Performance by Super-Hydrophobic and Super-Hydrophilic Coatings for Solar PV Cells,” *Coatings*, vol. 12, no. 4, 2022, doi: 10.3390/coatings12040502.
- [14] W. Zhao, Y. Lv, Q. Zhou, and W. Yan, “Investigation on particle deposition criterion and dust accumulation impact on solar PV module performance,” *Energy*, vol. 233, p. 121240, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121240>.
- [15] W. Zhao and H. Lu, “Self-Cleaning Performance of Super-Hydrophilic Coatings for Dust Deposition Reduction on Solar Photovoltaic Cells,” *Coatings*, vol. 11, no. 9, 2021, doi: 10.3390/coatings11091059.
- [16] X. Wang, J. P. Nshimiyimana, D. Huang, X. Diao, and N. Zhang, “Durable superhydrophilic and antireflective coating for high-performance anti-dust photovoltaic systems,” *Appl. Nanosci.*, vol. 11, no. 3, pp. 875–885, 2021, doi: 10.1007/s13204-020-01643-0.
- [17] H. Lu, R.-R. Cai, L.-Z. Zhang, L. Lu, and L. Zhang, “Experimental investigation on deposition reduction of different types of dust on solar PV cells by self-cleaning coatings,” *Sol. Energy*, vol. 206, pp. 365–373, 2020, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:225478387>.
- [18] L. Zhang, A. Pan, R. Cai, and H. Lu, “Indoor experiments of dust deposition reduction on solar cell covering glass by transparent super-hydrophobic coating with different tilt angles,” *Sol. Energy*, vol. 188, pp. 1146–1155, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.07.026>.
- [19] H. Salehi, A. Eshaghi, M. Rezazadeh, and H. Zabolian, “Antireflective and anti-dust modified silica based thin film on solar cell cover glass,” *J. Alloys Compd.*, vol. 892, p. 162228, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.162228>.
- [20] B. S. Yilbas, A. A. Abubakar, H. Al-Qahtani, A. S. Mohammed, and A. Al-Sharafi, “A novel method for dust mitigation from PV cell surfaces,” *Sol. Energy*, vol. 225, pp. 708–717, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.07.068>.
- [21] P. Wang, M. Kong, L. Wang, and L. Ni, “The Effect of the Superhydrophobic Film on the Generation Efficiency of Photovoltaic Modules Affected by Salt-Containing Dust Deposition,” *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 9, no. 6, pp. 1727–1732, 2019, doi: 10.1109/JPHOTOV.2019.2930909.
- [22] T. Sorndach, N. Pudchuen, and P. Srisungsithisunti, *Rooftop Solar Panel Cleaning Robot Using Omni Wheels*. 2018.
- [23] K. A. Moharram, M. S. Abd-Elhady, H. A. Kandil, and H. El-Sherif, “Influence of cleaning using water and surfactants on the performance of photovoltaic panels,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 68, pp. 266–272, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.01.022>.
- [24] F. Ekinçi, A. Yavuzdeğer, H. Nazlıgül, B. Esenboğa, B. Doğru Mert, and T. Demirdelen, “Experimental investigation on solar PV panel dust cleaning with solution method,” *Sol. Energy*, vol. 237, pp. 1–10, 2022, doi:

- <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.03.066>.
- [25] H. A. Kazem and M. T. Chaichan, "The effect of dust accumulation and cleaning methods on PV panels' outcomes based on an experimental study of six locations in Northern Oman," *Sol. Energy*, vol. 187, pp. 30–38, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.05.036>.
- [26] A. S. Alghamdi, A. S. Bahaj, L. S. Blunden, and Y. Wu, "Dust Removal from Solar PV Modules by Automated Cleaning Systems," *Energies*, vol. 12, no. 15, 2019, doi: 10.3390/en12152923.
- [27] D. Greig, "Heliotex Automatic solar panel cleaning system," 2009.
- [28] Karcher, "Innovative cleaning solutions for photovoltaic and solar panels," 2024. <https://www.karcher.com/us/commercial/pressure-washers/isolar-clean-solar-modules-effectively-and-increase-electricity-production.html>.
- [29] N. Sugiarta, I. G. N. Ardana, I. M. Sugina, I. B. G. Widiyantara, I. N. Suparta, and I. K. Adi, "Preliminary design and test of a water spray solar panel cleaning system," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1450, no. 1, pp. 0–7, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1450/1/012108.
- [30] X. Du, F. Jiang, E. Liu, C. Wu, and F. H. Ghorbel, "Turbulent airflow dust particle removal from solar panel surface: Analysis and experiment," *J. Aerosol Sci.*, vol. 130, pp. 32–44, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2019.01.005>.
- [31] D. Li, M. King, M. Dooner, S. Guo, and J. Wang, "Study on the cleaning and cooling of solar photovoltaic panels using compressed airflow," *Sol. Energy*, vol. 221, pp. 433–444, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.04.050>.
- [32] A. Assi, A. Hassan, M. Al-Shamisi, and H. Hejase, "Removal of air blown dust from photovoltaic arrays using forced air flow of return air from air conditioning systems," in *2012 International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC)*, 2012, pp. 1–5, doi: 10.1109/REDEC.2012.6416699.
- [33] X. Lu, Q. Zhang, and J. Hu, "A linear piezoelectric actuator based solar panel cleaning system," *Energy*, vol. 60, pp. 401–406, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.07.058>.
- [34] N. Sarode, P. Ghugal, S. Yadav, S. Dantule, and P. Nandankar, "A comprehensive review on solar panel cleaning robot technologies," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2753, no. 1, p. 20018, Apr. 2023, doi: 10.1063/5.0127800.
- [35] N. Hashim, M. Abdulrazaq Alshekhly, R. Selvarajan, S. Al-Zubaidi, and S. Mohammed Sarhan, *Study on Solar Panel Cleaning Robot*. 2019.
- [36] D. S. Cleaners, "Drone Sky Cleaners," 2024. <https://www.droneskycleaners.com/>.
- [37] Z. Brydon, K. Lee, and A. Hassani, "An Automated Framework for Drone-based Solar Panel Soiling Detection," *2023 8th Int. Conf. Robot. Autom. Eng.*, pp. 203–210, 2023, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:268384494>.
- [38] Z. Wang, P. Zheng, B. Bahadir Kocer, and M. Kovac, "Drone-Based Solar Cell Inspection With Autonomous Deep Learning," in *Infrastructure Robotics*, 2024, pp. 337–365.
- [39] A. G. Lupu, V. M. Homutescu, D. T. Balanescu, and A. Popescu, "A review of solar photovoltaic systems cooling technologies," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 444, no. 8, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/444/8/082016.