

# El impacto de los mantenimientos preventivos en los sistemas fotovoltaicos interconectados a la red de distribución eléctrica

López Esparza, Kassandra Elizabeth<sup>1</sup>, Perez Bustamante, Raúl<sup>2</sup>, y Garcia Ferrera, Guillermo Raúl<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Posgrado CIATEQ A.C. Cto. Aguascalientes Nte. 135, Parque industrial de Valle de Aguascalientes, 20358 Ags., México, [elizabthe643@gmail.com](mailto:elizabthe643@gmail.com)

<sup>2</sup> CONAHCYT-Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, Eje 126 225, Zona Industrial San Luis, 78395 San Luis, S.L.P., México [raul.perez@comimsa.com](mailto:raul.perez@comimsa.com)

<sup>3</sup> SUNNA POWER CAPITAL MANAGMENT, Av. Paseo de la reforma 180 P12, Juárez, 6600, Cuauhtémoc, Cuauhtémoc, Ciudad de México. México, [guillermo.garcia@topenergy.mx](mailto:guillermo.garcia@topenergy.mx)

## Resumen

La obligación de llevar un sistema o equipo a su máximo rendimiento y operación, así como la resolución de posibles fallas en el mismo, ha dado lugar a la necesidad de desarrollar un ámbito especializado dedicado exclusivamente a abordar estas obligaciones. De esto surge el campo del mantenimiento, cuyo propósito fundamental es asegurar el funcionamiento adecuado de los equipos o instalaciones en los cuales se lleva a cabo dicho trabajo, así como corregir y prevenir fallas o problemas en los sistemas en cuestión. El mantenimiento puede aplicarse en una amplia gama de sectores donde se necesite prevenir o corregir alguna operación, y en el caso del sector energético renovable esto no es una excepción. En particular, el mantenimiento de los sistemas fotovoltaicos interconectados a la red (SFIR) busca llevar la instalación a su mejor zona de operación y funcionamiento para con esto asegurar la generación de energía. Es por esta razón, que el sector energético se ha unido al desarrollo de una rama que se dedique a la operación y mantenimiento (O&M) de los sistemas fotovoltaicos. En este artículo se exponen los resultados de un estudio de mantenimiento preventivo en una instalación fotovoltaica ubicada en el estado de Aguascalientes, el cual fue realizado por Sunna Power, una empresa dedicada a ofrecer servicios de mantenimiento a SFIR en México. El trabajo explorará el estado de la instalación previo al mantenimiento y su situación una vez que éste ha sido ejecutado. Aun cuando los SFIR requieren poco mantenimiento, este artículo pretende demostrar que a pesar de esto la implementación de un plan de mantenimiento en las instalaciones puede generar un impacto positivo en la producción de energía del sistema, mostrando los resultados obtenidos en el mantenimiento ejecutado en la instalación fotovoltaica.

**Palabras clave**— Mantenimiento preventivo, Módulo fotovoltaico, Plan de mantenimiento, Sistema fotovoltaico,

## Abstract

The obligation to ensure that a system or piece of equipment achieves its maximum performance and functionality, and to correct any failures that may occur, has led to the need to develop a specialized field dedicated exclusively to meeting these obligations. This has given rise to the field of maintenance, the basic aim of which is to ensure the correct functioning of the equipment or installations on which the work is carried out, and to correct and prevent any failures or problems in the systems concerned; maintenance can be applied in a wide range of sectors where it is necessary to prevent or correct an operation, and the renewable energy sector is no exception. In particular, the maintenance of photovoltaic systems connected to the grid (SFIR) aims to bring the installation to its best operational and functional range in order to guarantee energy production; it is for this reason that the energy sector has participated in the development of a branch dedicated to the operation and maintenance (O&M) of photovoltaic systems. This article presents the results of a preventive maintenance study in a photovoltaic plant located in the state of Aguascalientes, carried out by Sunna Power, a company dedicated to providing maintenance services to SFIR in Mexico. The study examines the condition of the installation before maintenance and the situation after maintenance. Although SFIR requires little maintenance, this article aims to demonstrate that the implementation of a maintenance plan in the plants can nevertheless have a positive impact on the energy production of the system, displaying the results obtained in the maintenance carried out on the photovoltaic installation.

**Keywords**— Preventive Maintenance, Maintenance plan, Photovoltaic system.

## I. INTRODUCCIÓN

La historia del mantenimiento, como parte estructural de las empresas, data desde el momento mismo de la aparición de las máquinas para la producción de bienes y servicios, inclusive desde cuando el hombre forma parte de la energía de dichos equipos [1].

El mantenimiento surge de la necesidad de conservar el rendimiento y funcionamiento de un sistema, equipo o servicio, minimizando las posibles fallas de estos.

Los primeros departamentos de mantenimiento se crearon cuando las máquinas se fueron haciendo más complejas y la dedicación a tareas de reparación aumentaba, por lo que los

operarios ya no podían dedicar tiempo a estas actividades. Las tareas en estas épocas eran básicamente correctivas, dedicando todo su esfuerzo a solucionar las fallas que se producían en los equipos [2].

La función concreta de mantenimiento es sostener la funcionalidad y el cuerpo de un objeto o aparato productivo para que cumpla su función de producir bienes o servicios [1].

La creciente adopción de sistemas de energía renovable en estas últimas décadas, particularmente la popularización del uso de plantas fotovoltaicas como alternativa para reducir los costos de consumo eléctrico, creó la necesidad de implementar la operación y mantenimiento de dichos sistemas.

Desde el punto de vista del mantenimiento fotovoltaico, se busca maximizar la generación de energía, evitar los tiempos de inactividad, minimizar las fallas, evitar las fallas más costosas y aumentar la vida útil de la planta fotovoltaica. Aunque un sistema fotovoltaico funciona automáticamente, un mantenimiento regular es una tarea indispensable y necesaria [3].

El Plan de Mantenimiento que se debe realizar a cada sistema fotovoltaico depende de su contexto operacional, es decir, de las condiciones ambientales del sitio, los equipos utilizados y el lugar de instalación. Es difícil proponer un plan de mantenimiento que sea solución única para todos los proyectos que se instalen [3].

En la literatura se describen diferentes tipos de mantenimiento, pero en su mayoría coinciden en dos sin excepciones, y su definición en el caso de los sistemas fotovoltaicos son los siguientes:

Mantenimiento preventivo, busca evitar o mitigar las consecuencias de fallas de los equipos y del sistema y así aumentar su disponibilidad, limitar los costos y aumentar la vida útil de las instalaciones fotovoltaicas. [4]. Se caracterizan por su periodicidad, es decir, por el tiempo transcurrido entre dos operaciones iguales y consecutivas. La determinación de esta periodicidad es fundamental y debe obedecer a criterios lógicos, racionales y justificados [5].

Mantenimiento correctivo, se realiza después de haber ocurrido un fallo o problema, con el objetivo de restablecer la operatividad del mismo, corresponde a todas las operaciones de reparación y/o sustitución de partes necesarias para asegurar que el sistema funcione correctamente durante su vida útil. Estos no son programables ya que derivan de una avería, se debe realizar un diagnóstico para determinar las causas del fallo con la finalidad de tomar las medidas adecuadas [4].

Es necesario mencionar que los fallos resultado de la puesta en marcha generados por un mal diseño o instalación no son responsabilidad del área de O&M.

La implementación del mantenimiento en cualquier dominio conlleva métodos específicos según el equipo o servicio al que se aplique. Cada sistema presenta sus propios requisitos y enfoques de trabajo distintos.

## II. MÉTODOS

Los SFIR son sistemas confiables que requieren poco mantenimiento, sin embargo, la implementación de este puede prevenir fallas y mejorar el rendimiento del mismo. Los sistemas fotovoltaicos tienen por lo general un tiempo de vida útil de 25 años, pero para que estos puedan dar el rendimiento esperado es necesario el monitoreo de los mismos y ejecutar un plan de mantenimiento, este plan dependerá de las condiciones de la instalación. Dependiendo desde su instalación hasta el medio ambiente en el que se encuentra expuesto [3].

La frecuencia de los mantenimientos preventivos dependerá tanto de las condiciones ambientales como de las particularidades de la instalación en sí. En el caso específico de la instalación en cuestión, se ha recomendado al cliente llevar a cabo mantenimientos preventivos cada seis meses; la instalación se encuentra en una zona industrial ubicada a las

afueras de la ciudad, además de ser un estacionamiento solar con una altura de 13m, su altura contribuye a minimizar las posibles fallas que podrían llegar a ocasionarse por manipulaciones inadecuadas, ya que se requiere personal calificado para acceder a ella, además de que la ligera inclinación de los módulos genera una capa uniforme de acumulación de suciedad y no en los puntos más comunes de estos (parte hacia donde se genera el ángulo), a diferencia de lo que puede ocurrir en instalaciones con inclinaciones más pronunciadas.

El monitoreo de la planta desempeña un papel crucial, ya que a partir de este se tiene la oportunidad de obtener información del estado de los equipos, así como valores de medición, además de que pueden alertar sobre posibles alarmas de fallas en los inversores, con esto se pueden prevenir fallos graves en la instalación y tomar medidas adecuadas a tiempo [6]. Asimismo, la inspección visual físicamente en planta también ofrece valiosa información para detectar posibles fallas. Igualmente, al encontrarse físicamente en la instalación se pueden llevar equipos y herramientas necesarios para la comprobación del funcionamiento del sistema, como puede ser, multímetro, torquímetro, analizador de red, comprobador de instalaciones, secuenciómetro, telurómetro, equipos de medición multifunción, cámaras termográficas etc.

Para llevar a cabo el correcto mantenimiento de una SFIR es necesario que el equipo cuente con la documentación e información necesaria del sistema y que esta coincida con lo instalado, es decir que se cuente con los planos As Built del sistema, diagramas unifilares, así como datos de acceso, lista de componentes, fichas técnicas, información del instalador, bitácora de mantenimientos previos, datos de la puesta en marcha y pautas para la ejecución de tareas [4][7].

Cada elemento de un SFIR demanda atención en materia de mantenimiento; entre los componentes cruciales de la instalación que requieren acciones específicas se encuentran:

- Estructura, existen diferentes tipos de estructuras para la fijación de los módulos en los SFIR, comúnmente estas son fabricadas a base de aluminio y están diseñadas para la sujeción en diferentes tipos de techos como se muestra en la Fig. 1. Su elección dependerá de las condiciones del lugar donde se planea realizar la instalación. La estructura puede verse afectada con el paso del tiempo, experimentando ciertos cambios, como puede ser el aflojamiento de los tornillos y componentes que la



Fig. 1. Estructura de aluminio.

conforman, así como deformaciones, aunque estas son poco comunes [8]. Para llevar a cabo su mantenimiento adecuado, es esencial consultar la ficha técnica proporcionada por el fabricante, esto con la finalidad de contar con los valores de par recomendados para dicha estructura. Durante la inspección en el mantenimiento es fundamental verificar que los valores de par con los que cuenta la estructura en ese momento coincidan con los especificados por el fabricante. Además, es importante confirmar que la estructura se encuentre aterrizada en su totalidad.

- Módulos fotovoltaicos. Desempeñan el papel fundamental de captar la radiación solar y transformarla en energía eléctrica. En relación con los módulos un factor crítico que puede afectar el rendimiento es la acumulación de polvo, la cual puede reducir la producción del sistema y dar origen a puntos calientes. También pueden presentarse fisuras o roturas [9].

Para su correcto mantenimiento es necesario realizar una inspección visual donde se valoren posibles daños en su superficie y la cantidad de suciedad que pudieron haber acumulado; para una evaluación más completa es recomendable el uso de una cámara termográfica que permita detectar puntos calientes. Es importante verificar si han realizado modificaciones a los alrededores de la instalación que puedan generar sombras sobre los módulos, las cuales también pueden generar defectos en los paneles al generar puntos calientes, véase en Fig. 2.

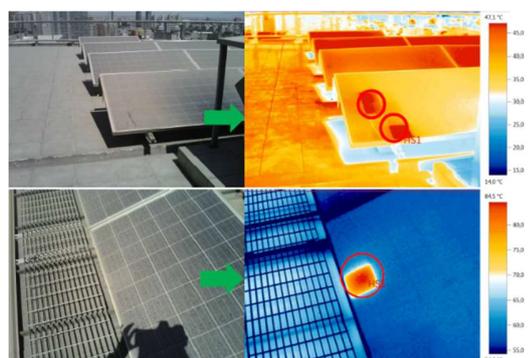


Fig. 2. Puntos calientes en módulos fotovoltaicos [3].

- Inversores. Cumplen un papel importante en la conversión de la energía generada por los módulos la cual es transformada de corriente directa (DC), a corriente alterna (CA), que es el tipo de energía más común utilizado por el ser humano. Los inversores son los componentes electrónicos que permiten el acceso a los detalles de la planta, además de llevar a cabo la conversión de la energía, los inversores tienen integrado el equipo de monitoreo, lo que les permite enviar datos a la plataforma a la que están vinculados, esto dependiendo de la marca de los mismos. En caso de detectar alguna alarma, notifican ésta en el portal, además de exponerla en la pantalla o interfaz local del equipo. Si la alarma es grave el equipo se bloqueará automáticamente con la intención de protegerse y solo retomará su funcionamiento normal una vez que la falla haya sido solventada. Para un mantenimiento eficaz, es importante que los equipos sean monitoreados también remotamente, lo que contribuye en la prevención de posibles

fallas, en la Fig. 3 puede observarse la interfaz de monitoreo. La revisión de las conexiones tanto visualmente como con el uso de cámara termográfica, resulta útil para identificar malas conexiones o puntos calientes. Es importante destacar que estos equipos están diseñados para ser instalados en la intemperie, no obstante, se recomienda ubicarlos en lugares protegidos donde no estén directamente expuestos al sol y la lluvia. También es necesario verificar que se hayan instalado con buena ventilación, siguiendo las pautas establecidas de separación indicadas por el fabricante entre ellos y a objetos cercanos.



Fig. 3. Interfaz en portal de monitoreo.

- Componentes eléctricos. Abarcan una variedad de elementos, como interruptores termomagnéticos, seccionadores, bases de fusibles, bloques de distribución, cables de DC, cables de AC, cajas combinadoras, entre otros. Realizar una inspección visual de los componentes en físico resulta altamente beneficioso. Al igual que en los puntos anteriores el uso de cámara termográfica facilita la verificación de la temperatura de operación del equipo y la detección de alguna avería o conexiones deficientes. La medición de voltajes y corrientes en los equipos es de suma importancia para el mantenimiento, ya que contribuye en verificar que los componentes estén instalados y diseñados en acorde a los valores que la instalación entrega, además de que asegura el paso de energía en estos puntos, véase en la Fig. 4. En cuanto a los cables, las pruebas de resistencia de aislamiento son importantes para la identificación de cables dañados o malas conexiones, sin embargo, la inspección visual es indispensable. En escenarios en los que se cuente con cajas combinadoras, que cuentan con una serie de componentes, se debe de llevar el mismo proceso que con los componentes individuales. Si durante las inspecciones visuales y las pruebas realizadas a los equipos se encuentran fallas, estas deben ser solventadas.



Fig. 4. Medición de voltaje en componentes eléctricos.

Si se encuentran equipos dañados, estos deben ser reemplazados. En ambos casos, es esencial rastrear y analizar el origen de la falla. Todos los hechos deben ser documentados meticulosamente en los informes de mantenimiento para futuras referencias y desarrollar una solución para evitar la recurrencia constante de la falla.

Es de vital importancia resaltar que el personal a cargo de los mantenimientos debe ser sumamente cuidadoso en los trabajos que realice y seguir los protocolos de seguridad pertinentes, esto para garantizar la seguridad tanto de los individuos como de los activos materiales [10].

La planificación del mantenimiento debe considerar la disponibilidad de la planta para poder realizar los trabajos pertinentes, ya que hay ocasiones en las que los componentes tengan que ser desenergizados para poder manipularlos o llevar a cabo ciertas pruebas. Junto a esto, se debe de analizar el área de trabajo y asegurarse de que cumpla con las condiciones necesarias para poder llevar a cabo dichas tareas de manera efectiva.

Cada componente de la instalación requiere acciones específicas de mantenimiento, ya sea para prevenir o corregir. En el caso de estudio abordado en este artículo, se ejecuta un mantenimiento preventivo a la instalación.

### III. RESULTADOS

#### A. Información de la instalación

Dentro de las instalaciones de la empresa del cliente se encuentra un sistema fotovoltaico que cuenta con una capacidad instalada de 1.5MW. Este sistema está compuesto por un total de 3,526 módulos fotovoltaicos y 18 inversores de 70kW.

La distribución de esta instalación abarca distintos techos de las naves industriales de la empresa, destacando especialmente un estacionamiento fotovoltaico que es el que alberga la mayoría de los módulos fotovoltaicos instalados. La potencia del sistema fotovoltaico está dividida en tres servicios de electricidad diferentes. Para la presentación de resultados se analizará la fase 1 de proyecto, que es la que se encuentra instalada en el estacionamiento fotovoltaico mencionado. Este estacionamiento cuenta con 1,991 módulos fotovoltaicos, de los cuales, 1,296 pertenecen a la fase 1 del proyecto.

Por lo tanto, el sistema que es el objeto de estudio consta de 498.96kW de potencia instalados, y se compone de los siguientes equipos:

- 1,296 módulos fotovoltaicos de 410W de la marca JA Solar
- 7 inversores de 70kW marca Growatt del modelo MAC 7KTL3-X MV
- 7 sistema de monitoreo Shine WIFI-X
- Estructura de aluminio marca Aluminext
- 7 interruptores termomagnéticos 3x125 marca ABB
- 2 interruptores termomagnéticos de 3x800 marca Siemens
- Cable CA de cobre forrado de los calibres 1/0 y 4/0 AWG
- Cable CA de aluminio forrado 4/0 AWG
- Cable CA de aluminio desnudo 2/0 AWG
- Cable de cobre desnudo de los calibres 10, 6 y 2/0 AWG
- Cable CD de fotovoltaico forrado de los calibres 12 y 10 AWG

El sistema fue puesto en operación en febrero del año 2021, presenta una inclinación de 5 grados, la estructura y los módulos fotovoltaicos fueron montados sobre una base preexistente diseñada para el estacionamiento en el patio de maniobras de los tráileres de la empresa, esta configuración coincide con la utilizada para la instalación de naves industriales, la superficie se dividió en tres secciones y se colocaron pasos de gato entre ellas para facilitar el acceso del personal de mantenimiento. Se instalaron escaleras marinas para llegar a estas secciones, sin embargo, en las ocasiones que se ha accedido al lugar se ha optado por el uso de una plataforma de tijera para un acceso más rápido, esto, además, agiliza el ascenso de los equipos necesarios para realizar el mantenimiento.

En el caso de los inversores y tableros, se encuentran ubicados justo debajo de los módulos fotovoltaicos, estando a una altura considerable. Para asegurar el tránsito seguro del personal en esta área, se instalaron rejillas y barandales. De igual manera se colocó una escalera marina para acceder de una manera más rápida a ellos. Sin embargo, los interruptores principales de la instalación se encuentran ubicado a nivel de piso, cerca de los transformadores de los servicios a los que fueron conectados. Éstos fueron instalados estratégicamente en estos puntos con el propósito de garantizar que, en caso de incidentes, el sistema pueda apagarse con facilidad. Al estar ubicados en puntos de acceso rápido, los interruptores permiten al personal actuar de manera eficiente en caso de una emergencia, ya que la altura del resto de los equipos dificulta su accesibilidad, véase en Fig. 5.

#### B. Previo al mantenimiento

Es importante tomar evidencia como respaldo, del estado de la instalación previamente a llevar a cabo cualquier tarea de mantenimiento. Además de apoyar con la documentación, ésta ayuda a tener un marco de referencia al evaluar los resultados del mantenimiento ejecutado. La toma de fotografías puede ser particularmente valiosa en esta etapa, ya que resulta útil tanto antes de iniciar los trabajos como para la elaboración de una inspección visual.

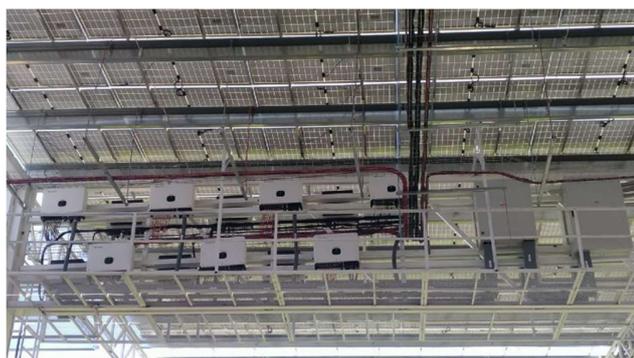


Fig. 5. Ubicación de inversores y tableros.

En la Fig.6 se presenta el estado de los módulos fotovoltaicos previamente, se observa una capa densa de polvo que cubre la superficie total de los módulos.



Fig. 6. Suciedad en módulos fotovoltaicos.

Se revisa el estado de los inversores para verificar que ninguno de estos tiene alguna alarma o advertencia. En la Fig. 7, se muestra el estado de uno de los inversores. Cuando el led en forma de hoja se encuentra en color verde, significa que el equipo se encuentra trabajando adecuadamente. Si el led se encuentra en amarillo, el equipo sigue funcionando, pero con una alarma que, si bien no representa un peligro inmediato a la instalación, requiere su atención. En caso de que el Led se encuentre en color rojo, significa que el equipo se ha bloqueado automáticamente debido a una falla significativa. En este sistema, no se encontró ningún equipo con algún tipo de alarma.



Fig. 7. Inversor en correcta operación.

De igual manera se realiza una inspección visual de la estructura para descartar la presencia de deformaciones o falta de aterrizaje, en este caso, la estructura cuenta con sus puntos de conexión a tierra conectados adecuadamente y no presenta deformaciones como se muestra en la Fig. 8.



Fig. 8. Estructura debidamente aterrizada.

En relación con el resto de los componentes, no presentan diferencias notables ya que estos se encuentran más cubiertos y no se ven afectados por las inclemencias del clima, además de que los gabinetes se encuentran sellados por lo que la entrada de polvo es prácticamente nula, véase la Fig. 9.



Fig. 9. Gabinete de ITM's de inversores.

Una vez completada la inspección del estado de los equipos previos al mantenimiento, para detectar alguna anomalía y determinar las actividades a realizar más allá de las ya preestablecidas en el plan de mantenimiento, se procede a iniciar con las labores del mantenimiento preventivo.

### C. Ejecución del mantenimiento

Comenzando con la estructura, se procede a revisar la ficha del fabricante para determinar el par indicado para la estructura, la cual debe estar en 15Nm, se procede a realizar una inspección de los tornillos de la estructura utilizando el torquímetro, es importante destacar que se permite un margen cercano al valor estimado por el fabricante.



Fig. 10. Prueba de torque en estructura.

Como se puede apreciar en la Fig. 10, el valor del par se encuentra muy próximo al valor indicado por el fabricante, en situaciones como esta, no es necesario apretar los tornillos ya que existe el riesgo de sobrepasar el valor y generar fisuras en los módulos fotovoltaicos. Dado que la instalación es fija, no experimenta cambios significativos en el par de la instalación, sin embargo, es necesario revisarlo dado que por la experimentación de cambios de temperatura la tornillería tiende a aflojarse por temas de dilatación en los materiales. Los valores obtenidos se mantuvieron iguales o muy cercanos al valor recomendado, por lo que no se requirió ajustar la tornillería de la estructura.

En cuanto a los paneles, después de completar la inspección visual, se procede a realizar la limpieza. En este caso por ser una instalación de tal magnitud, se emplea un robot limpiador para realizar los trabajos de manera más eficaz, como se muestra en la Fig. 11. Este robot cuenta con un sistema de cepillos y agua con los que retira el exceso de polvo.

Una vez finalizada la limpieza, se lleva a cabo una inspección visual adicional para asegurarse que el polvo no haya ocultado posibles defectos en los paneles.



Fig. 11. Limpieza de paneles.

En relación con los componentes eléctricos y los inversores, se toma termografía de cada equipo con la finalidad de inspeccionar puntos calientes, posibles fallas en los equipos o malas conexiones. Para los paneles se ha realizado la misma actividad, véase la Fig. 12.

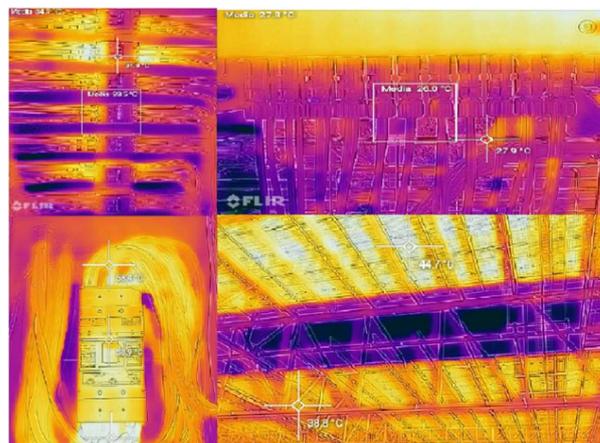


Fig. 12. Fotos termográficas de ITM's de inversores, conexiones de MC4 a inversores, ITM principal y paneles.

En las tomas termográficas no se detectaron anomalías, cabe mencionar que la instalación únicamente es manipulada por el personal correspondiente y calificado, por esta razón, es poco probable que los equipos fallen si su dimensionamiento es el correcto y no ha sido intervenidos por personal no autorizado. Las tomas termográficas se han realizado alrededor de la 1:00pm, momento en el cual el sistema se encuentra en su máximo punto de producción, de esta manera es que podemos evaluar el funcionamiento de los equipos en las condiciones de radiación más elevadas que puedan experimentar.

Con el fin de comprobar que todas las cadenas estén generando energía de manera adecuada, se realizaron las pruebas de curvas IV en las cadenas de cada inversor. Para llevar a cabo esta tarea, se utilizó el equipo de medición Metrel MI3108. Para comprobar que el mantenimiento de una instalación puede obtener grandes beneficios en la producción de la instalación, se toman valores previos al mantenimiento y después de este, para realizar una comparación.

Para ilustrar el proceso, se expondrán únicamente los datos correspondientes a un inversor. El inversor que se someterá al análisis cuenta con tres seguidores de máxima potencia, con cuatro entradas cada uno, totalizando así una capacidad de doce entradas, las configuraciones de cadenas conectadas a este inversor constan de once cadenas, cada una compuesta de dieciocho módulos fotovoltaicos.

La Fig. 13 exhibe el gráfico resultante de la prueba de curva IV de la cadena 1- inversor 1 previo a la ejecución del mantenimiento. Se observan dos curvas, ya que el equipo genera la curva superior con base en lo que experimenta con la celda propia del equipo a la hora de la medición, dicha celda es colocada en la misma posición en la que se encuentran instalados los módulos de la cadena a analizar y es conectada al equipo de medición, la celda utilizada recibe la misma radiación

que los módulos en cuestión, con la diferencia de que la celda se encuentra libre de suciedad, lo que permite generar la curva IV de esta celda como punto de referencia.

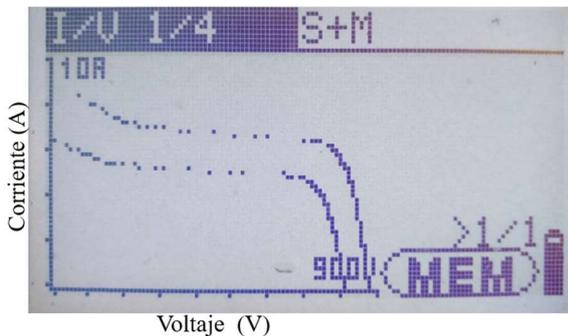


Fig. 13. Curva IV cadena 1 previo al mantenimiento.

En la Fig. 13, se puede observar que la corriente en este punto posee un valor de 5A, sin embargo, tras la ejecución del mantenimiento, dicha corriente se incrementa en un 50%, dando como resultado un valor de 10A, como puede verse en la Fig 14.

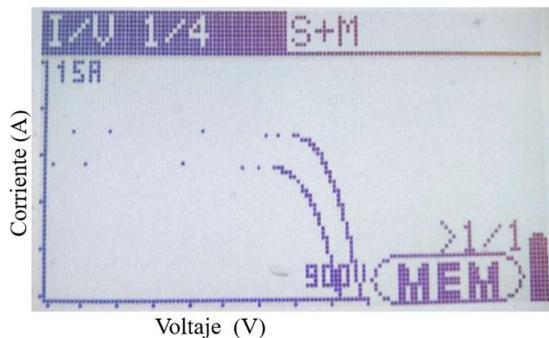


Fig. 14. Curva IV cadena 1 después del mantenimiento.

A continuación, se presenta una lectura más de las curvas IV obtenidas de las cadenas del inversor en cuestión, en este caso, se muestran los valores de medición correspondientes a la cadena 5- inversor 1, donde la diferencia es aún más notable, ya que en la primera medición registra una corriente de 3.5A, mientras que en la segunda medición revela una corriente de 9A, véanse las Fig. 15 y Fig. 16. En este caso en particular, sólo se graficó la curva IV del inversor previo al mantenimiento para tener una visualización más clara del valor obtenido, debido a que en esta cadena la corriente se presentaba más baja que en el resto y se buscaba obtener un valor más certero.

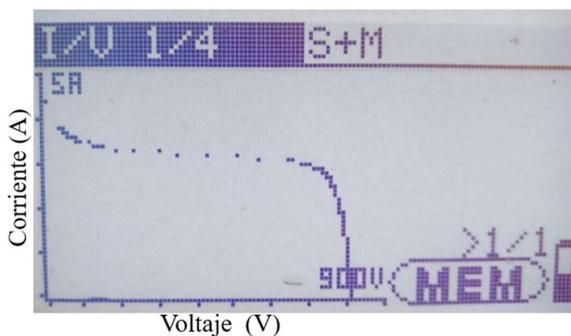


Fig. 15. Curva IV cadena 5 previo al mantenimiento.

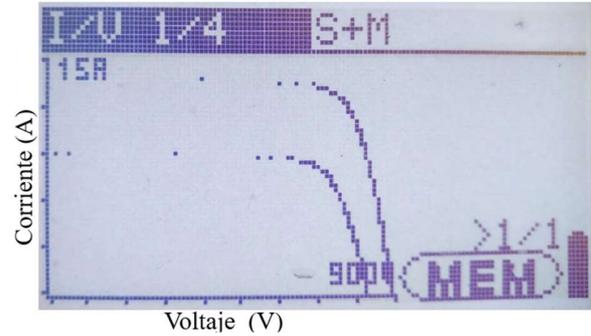


Fig. 16. Curva IV cadena 5 después del mantenimiento.

La Tabla 1 sintetiza la recopilación de los valores obtenidos de las curvas IV en el resto de las cadenas conectadas al inversor 1. De esta manera, la tabla permite visualizar de manera más directa los incrementos en los valores de corriente de cada cadena.

TABLA I  
VALORES DE MEDICIÓN EN INVERSOR 1

Cadena	Voltaje (V)	Corriente antes del mantenimiento (A)	Corriente después del mantenimiento
1	813	5	10
2	812	7	10
3	817	6	9
4	814	8	10
5	815	3.5	9
6	813	5	11
7	810	4	9
8	814	8	10
9	816	7	10
10	810	6	9
11	810	7.5	10

D. Después del mantenimiento

Una vez concluido el mantenimiento preventivo, es posible apreciar los resultados obtenidos como consecuencia de su ejecución, un claro ejemplo radica en la limpieza de los módulos fotovoltaicos, lugar donde el impacto de las tareas de mantenimiento se hace particularmente más visible y puede ejercer un efecto significativo en la generación, ver la Fig. 17.



Fig. 17. Estado de los módulos fotovoltaicos después del mantenimiento.

La limpieza ha demostrado ser uno de los factores más relevantes para el incremento de la generación del sistema.

Referente a las demás labores realizadas, estas también generan, desde luego, un impacto positivo en el mantenimiento de la planta. La revisión minuciosa de los componentes contribuye a prevenir posibles fallas y anticipar problemas potenciales. El hecho de mantener dichos componentes en buenas condiciones también garantiza el funcionamiento óptimo de la planta y por ende garantiza el rendimiento adecuado.

En cuanto al resto de los componentes, no se requirió mantenimiento más allá de lo que se tenía contemplado en el plan de mantenimiento (PM) preventivo, por lo que sus condiciones permanecen inalteradas.

Los resultados de este análisis se manifiestan de manera más evidente en los datos de producción registrada en los sistemas de monitoreo de la planta. Podemos observar en la gráfica mensual, que, durante los primeros días del mes, específicamente del día uno al día ocho, existe un promedio de producción de 1445.65kWh, sin embargo, a partir de la ejecución del mantenimiento preventivo los días ocho y nueve, se evidencia claramente el aumento marcado en la producción, alcanzando un promedio de 2197.022kWh, desde el día nueve hasta el treinta y uno. La gráfica aumenta drásticamente, destacando el incremento en su producción como lo muestra la Fig. 18.



Fig. 18. Gráfica mensual de monitoreo del sistema fotovoltaico.

La estimación promedio de pérdidas por suciedad se sitúa en un rango de 20%-30%, mientras que el incremento promedio en la producción se evalúa en un 25%.

#### IV. CONCLUSIÓN

La evidente mejora de SFIR, respaldada por los resultados obtenidos de las pruebas realizadas durante el mantenimiento preventivo, junto con el ahorro monetario resultante del incremento de producción, nos conduce a una conclusión clara. El mantenimiento, ya sea preventivo o correctivo, es de vital importancia en los sistemas fotovoltaicos interconectados a la red. Es recomendable la implementación de un PM para las instalaciones, no solo por el impacto positivo en la producción, sino también por las salvaguardas de la integridad y seguridad de las instalaciones en sí.

La optimización de la producción y la prolongación de la vida útil de los equipos son resultados tangibles y directos de la gestión adecuada del mantenimiento de los sistemas. La

inversión en mantenimiento revela una estrategia esencial para garantizar un rendimiento óptimo y sostenible de los SFIR, y su implementación debe ser considerada una prioridad en la gestión de estas instalaciones.

#### REFERENCIAS

- [1] Mora Gutiérrez A., "Mantenimiento Planeación, ejecución y control", *Alfaomega, México*, Sep 2019, pp. 4-6
- [2] García Garrido S., "Ingeniería de mantenimiento Manual práctico para la gestión eficaz del mantenimiento", *Renovetec*, 2009-2012 pp.1-10
- [3] Soto Olea G., Hernandez Venegas J., Almazar D., Jofré I., Ukar A., "Guía de operación y mantenimiento de sistemas fotovoltaicos", *Ministerio de energía de Chile*, Santiago de Chile, Nov 2018 pp.32-72
- [4] Arq.Airasca L., "Diseño de metodologías para la implementación, puesta en marcha, sistematización y mantenimiento de instalaciones solares fotovoltaicas sobre cubiertas", Rosario 2021 pp.165-179
- [5] CENSOLAR, "Curso experto profesional en energía fotovoltaica", *PROGENSA*, Sevilla, España, 2009 pp.51-59
- [6] Solar Power Europe, "Operation & Maintenance Best Practice Guidelines", *Solar Power Europe*, Version 5.0, December 2021 pp.60-61
- [7] IEC, "Photovoltaic (PV) systems – Requirments for testing, documentation and maintenance – Part 1: Grid connected systems – Documentation, commissioning tests and inspection", *IEC*, Geneva, Switzerland, January 2016 pp.10-13
- [8] CENSOLAR, "Instalaciones de energía Solar Tomo V Sistemas de conversión energética", *PROGENSA*, 5ta edición, Sevilla, España, 2008 pp.203-223
- [9] IEC, "Photovoltaic (PV) systems – Requirments for testing, documentation and maintenance – Part 2: Grid connected systems – Maintenance of PV systems", *IEC*, Geneva, Switzerland, March 2020 pp.26-27
- [10] De las Heras León M. E., "Mantenimiento de las instalaciones solares fotovoltaicas", *IC Editorial*, 2da edición, Malaga, , 2017. pp. 8-13