

UNIVERSIDAD DON BOSCO  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**UNIVERSIDAD  
DON BOSCO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN:

**“Optimización de Frecuencia de Limpieza de Paneles Solares Fotovoltaicos Expuestos  
a Ambientes de Alta Concentración de Particulado en el Aire”**

PARA OPTAR AL GRADO DE:

**MAESTRO EN GESTIÓN ENERGÉTICA Y DISEÑO AMBIENTAL**

**PRESENTADO POR:**

CARLOS EDUARDO VICHE LEMUS

**ASESORA:**

CRISTINA MORATAYA DE ALVARENGA

ANTIGUO CUSCATLÁN, LA LIBERTAD, EL SALVADOR, CENTROAMÉRICA  
JULIO DE 2025.

## CONTENIDO

|  |    |
|--|----|
| ABREVIATURAS.....  | 1  |
| CAPÍTULO 1 “INTRODUCCIÓN”.....   | 2  |
| 1.1 OBJETIVOS.....   | 4  |
| 1.2 ALCANCES.....  | 5  |
| 1.3 JUSTIFICACIÓN.....   | 5  |
| 1.4 METODOLOGÍA.....   | 8  |
| CAPÍTULO 2: “INSTALACIÓN DE UN SISTEMA DE<br>MEDICIÓN DE POTENCIAS Y VALORES MEDIDOS” .....                              | 11 |
| 2.1 MEDICIÓN DE POTENCIAS EN PANELES DE CONTROL.....   | 11 |
| 2.2 REGISTRO DE POTENCIAS EN PANELES DE CONTROL.....   | 14 |
| CAPÍTULO 3: “COSTO ECONÓMICO DE UNA LIMPIEZA DE<br>PANELES SOLARES Y DE LA ENERGÍA NO SERVIDA”.....                      | 18 |
| 3.1 VALOR ECONÓMICO DE LA LIMPIEZA DE LOS PANELES SOLARES .....  | 18 |
| 3.2 ESTIMACIÓN DE LA ENERGÍA GENERADA EN PERIODO DE CONTROL.....   | 20 |
| 3.3 VALOR MONETARIO DE LA ENERGÍA NO GENERADA.....   | 22 |
| CAPÍTULO 4: “MODELO TÉCNICO-ECONÓMICO PARA ENCONTRAR EL<br>PUNTO DE EQUILIBRIO DEL PERIODO ENTRE CICLOS DE LIMPIEZA..... | 25 |
| 4.1 METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE VARIABLE RELEVANTE .....  | 25 |
| 4.2 ANÁLISIS DE DATOS .....  | 26 |
| CAPÍTULO 5: “CONCLUSIONES”.....  | 29 |
| REFERENCIAS.....   | 30 |

## ABREVIATURAS

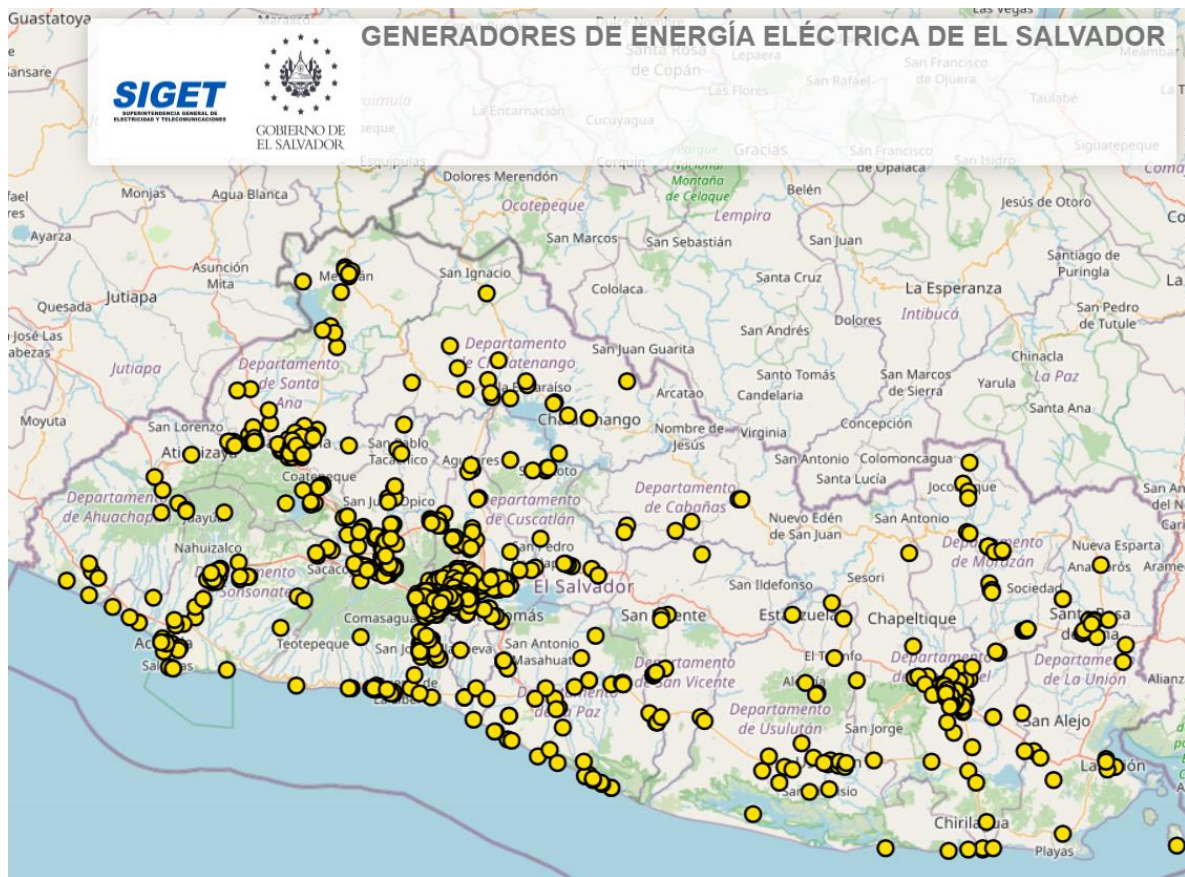
|       |  |
|-------|--|
| AC    | Corriente Alterna ( <i>Altern Current</i> por sus siglas en inglés). |
| DC    | Corriente Directa ( <i>Direct Current</i> por sus siglas en inglés). |
| msnm  | Metros sobre el nivel del mar.                                       |
| O&M   | Operación y Mantenimiento.   |
| SIGET | Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones.       |
| UPR   | Usuario Final Productor Renovable.                                   |

# CAPÍTULO 1.

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas fotovoltaicos se convirtieron en una de las principales tecnologías de generación de energía a partir de recursos renovables en la última década, ya que el precio de los componentes y la instalación ha disminuido en más del 85% desde la década de 1990 [1].

En El Salvador se han registrado cientos de proyectos de generación de energía eléctrica por medio de paneles solares, como se puede observar en la Fig. 1. Ya sea para uso residencial, comercial o industrial, esta tecnología es favorable para todos los sectores; ya que es una alternativa modular que le permite condicionar la capacidad a las distintas necesidades, requiere bajo mantenimiento, con tiempos de recuperación de la inversión cortos y es económicamente competitiva comparado al consumo de la red.



Fuente: Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones (SIGET), “Generadores de Energía Eléctrica de El Salvador”  
Fig. 1. Ubicación de proyectos de generación de energía con tecnología solar fotovoltaica.

En el ámbito de la energía fotovoltaica, hay condiciones climáticas y ambientales que desempeñan un papel fundamental en el rendimiento energético que se deben considerar para la operación. La acumulación de polvo y suciedad es una característica que ha atraído a investigadores de diferentes partes del mundo que buscan una mejor comprensión de estas

circunstancias, tratando de mitigar sus efectos sobre el rendimiento fotovoltaico, con el objetivo de maximizar la generación de energía y minimizar las pérdidas de potencia debidas a estos factores.

Pese a que estas condiciones ambientales no suelen ser relevantes en la mayoría de proyectos fotovoltaicos en El Salvador, existen escenarios adversos que requieren mayor atención por condiciones puntuales de la zona o la aplicación para la que se abastece la energía. Tal es el caso del plantel San Diego de La Cantera.

La Cantera S.A. de C.V. es una empresa dedicada a la producción de materiales pétreos, siendo dueña de 4 planteles de explotación de piedra: El Cerrito (ubicado en Quezaltepeque), La Hulera (ubicado en Usulután), Tihuapa (ubicado en La Paz) y San Diego (ubicado en el Puerto de La Libertad); siendo este último el más grande.

Durante 2021 el consumo mensual de energía eléctrica superaba los 385MWh, por lo que, se decidió construir un parque solar para la generación de energía eléctrica a partir de paneles fotovoltaicos. El primer semestre de 2022 se promedió un consumo mensual de 460MWh, por lo que se decidió instalar 4,710 paneles solares monocristalinos de 545Wp, sumando una potencia total de 2,566.95 kWp.

En 2022 se completó la construcción del parque solar en el Plantel San Diego, entrando en operaciones el 8 de noviembre de ese año. Como era de esperarse, la implementación de este proyecto redujo considerablemente el costo de energía eléctrica pagado a la distribuidora; por lo tanto, se proyecta recuperar la inversión del proyecto en un periodo menor a 6 años.

En las proyecciones financieras para el retorno de la inversión se han considerado condiciones de operación generalizadas para nuestro país, pero se ha desestimado los requisitos de mantenimiento propios de una instalación ubicada a 1.2km del mar, dónde la humedad y salinidad en el aire son mayores a lo acostumbrado en la ciudad, y en una cantera de producción de materiales pétreos. Al ser una mina de extracción de piedra, es abundante la generación de particulados finos de silicio que cubren con una película de polvo todos los objetos estáticos del plantel.

Partiendo de que la limpieza de paneles tiene una incidencia directa en la generación de energía, se reconoce que es una variable que vale la pena cuidar para obtener el máximo provecho de la instalación. En este caso, el instalador de la planta fotovoltaica incluyó un contrato de mantenimiento para el parque solar, en el cual se acordaron 2 limpiezas anuales.

Considerando las condiciones ambientales en las que se encuentra el proyecto, se ha identificado la necesidad de medir, monitorear y documentar la generación y potencia alcanzada por los paneles, con la finalidad de establecer un criterio técnico para la frecuencia de la limpieza de módulos fotovoltaicos más allá de lo establecido en el contrato de O&M.

Actualmente, el parque solar cuenta con un medidor AC en la entrada al sistema de distribución de energía del plantel. Sin embargo, no se cuenta con un parámetro de comparación que propicie la toma de decisiones.

Se ha investigado la metodología de monitoreo de esta variable en parques solares de mercado mayorista para tener un punto de partida para este estudio: se toman 2 paneles de la misma tecnología y uno se limpia con frecuencia mientras que el otro únicamente cuando el parque completo se ha limpiado. Este sistema permite comparar los rendimientos y las pérdidas de energía.

Durante este estudio se implementará ese sistema de monitoreo y se planteará un criterio en el que se justifique los recursos utilizados para la limpieza del parque comparado al beneficio económico que la mejora en la eficiencia de los paneles representa.

## **1.1 OBJETIVOS**

*General:*

Establecer criterios técnicos para programar la limpieza de paneles solares expuestos a ambientes de alta concentración de particulado en el aire, con el fin de obtener el mayor beneficio económico en referencia a la diferencia de rendimientos de paneles de control.

*Específicos:*

Instalar un sistema de medición de potencias generadas por dos módulos fotovoltaicos de control y registrar los valores obtenidos.

Establecer el costo económico de una limpieza de paneles solares para toda la planta fotovoltaica, incluyendo los costos indirectos; y de la energía que, a causa de suciedad y particulado terroso sobre los paneles solares, no se genera.

Diseñar un modelo técnico-económico para encontrar el punto de equilibrio del periodo entre ciclos de limpieza de la planta fotovoltaica.

## **1.2 ALCANCES**

Se realizó la toma y procesamiento de datos de potencia generada en DC de 2 módulos fotovoltaicos de control ubicados dentro del parque solar de La Cantera, Plantel San Diego durante un periodo de 20 semanas. El sistema de monitoreo se instaló para que funcione

únicamente con encendido manual del procesador, por lo que la obtención de datos no es autónoma; es decir, no se tienen lecturas de todos los días de operación, sino que solo cuando el sistema de monitoreo fue operado.

Pese a que es favorable presentar datos de un año completo para cubrir todas las estaciones climáticas y conocer el comportamiento completo, se inició este proyecto con el año calendario y se finalizó con el inicio del invierno por la desviación de la tendencia que las lluvias provocaron. Este periodo fue suficiente para concluir que si hay un cambio significativo en la potencia que justifique un cuidado especial comparado a proyectos que no están expuestos a ambientes de alto particulado en el aire; por lo que se requiere monitoreo y realización de cálculos correspondientes de forma constante que permitan establecer el parámetro que rijan la frecuencia ideal de limpieza.

Este estudio refleja únicamente las pérdidas de potencia cuando los paneles están en operación, no contempla condiciones de baja irradiancia al inicio del día, donde el arranque de los inversores puede ser retrasado; y por tanto la energía que debió generarse en ese periodo también representa una pérdida.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN**

La Cantera plantel San Diego es la mina de agregados pétreos más grande de El Salvador, por cuanto se requiere direccionar muchos esfuerzos y recursos en garantizar una operación eficiente, a precios competitivos y con altos estándares de calidad.

Considerando que el suministro de energía eléctrica es un servicio auxiliar para la producción y no involucra el rubro principal de la empresa, los esfuerzos de mejora continua están orientados al mantenimiento de maquinaria, la explotación de piedra, la producción de agregados y el acopio, traslado y venta de producto terminado.

Tras haber cerrado el segundo año de operaciones, empiezan a tenerse las primeras retroalimentaciones de la inversión. De manera reactiva, empieza a cobrar interés el desempeño de la planta fotovoltaica y se empieza a evaluar los indicadores que han impactado directamente en el pago promedio de energía eléctrica a la distribuidora.

Coincide también que el autor de este documento es el actual jefe de producción del plantel San Diego, por cuanto la reducción en los costos (incluido el gasto de electricidad) es de interés.

Durante el segundo semestre de 2024 no se reportaron excedentes de energía con la distribuidora, a diferencia de 2023 y el resto de 2024, donde la energía inyectada a la red excedía a la consumida de la distribuidora. Para finales de 2025 se espera la incorporación

de nueva maquinaria, por cuanto favorece establecer estrategias que permitan aprovechar al máximo los recursos energéticos existentes.

Como se ha destacado ya, el entorno de operación del plantel San Diego es muy polvoso, lo que genera películas de material particulado en la superficie de los objetos estáticos.



Fuente: Elaboración propia

Fig. 2. Vista de particulado en el aire durante el proceso de trituración.

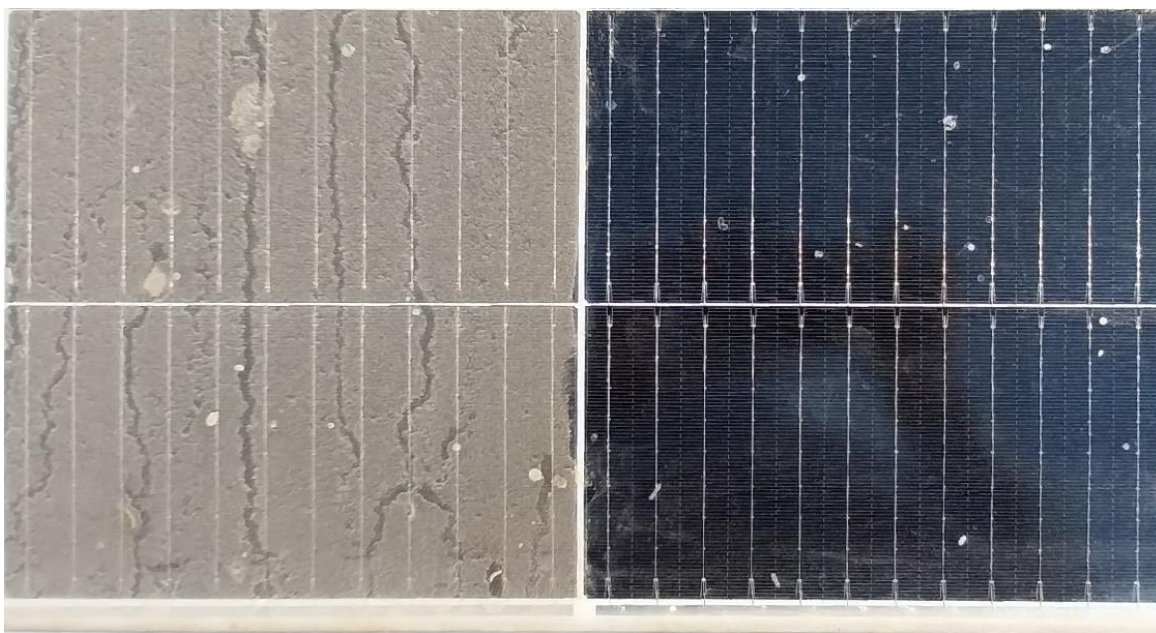
En el caso particular de la planta fotovoltaica, esta colinda al suroeste con un botadero de material terroso que es desalojado por actividades de la mina y es volcado en las cercanías del lindero del parque solar, por lo que es un foco de alta concentración de partículas de polvo; además de las ya generadas en el proceso de trituración.



Fuente: Elaboración propia

Fig. 3. Vista aérea de la Planta Fotovoltaica y botadero de material terrosos.

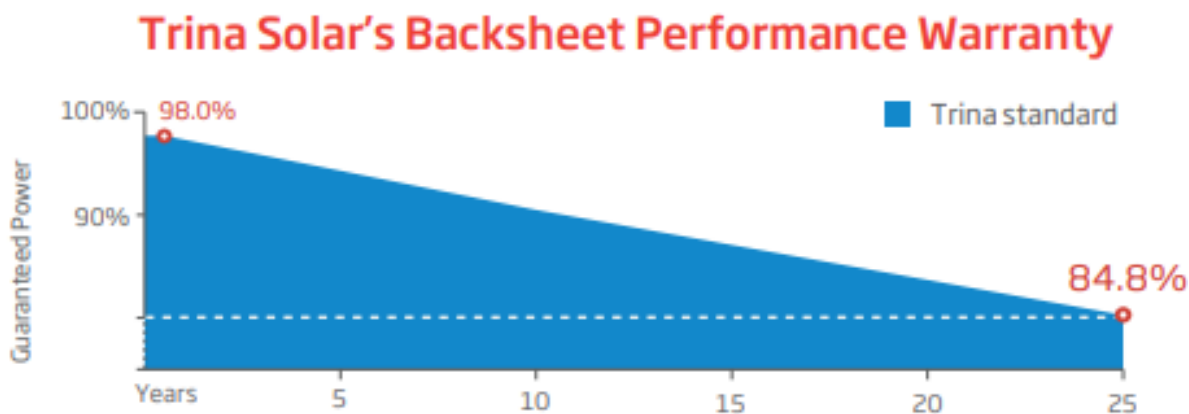
La Fig. 4 destaca el resultado del entorno al que están sometidos los paneles solares. La fotografía fue tomada justo antes de haberse completado la limpieza del parque.



Fuente: Elaboración propia

Fig. 4. Sección de un panel fotovoltaico antes de su limpieza.

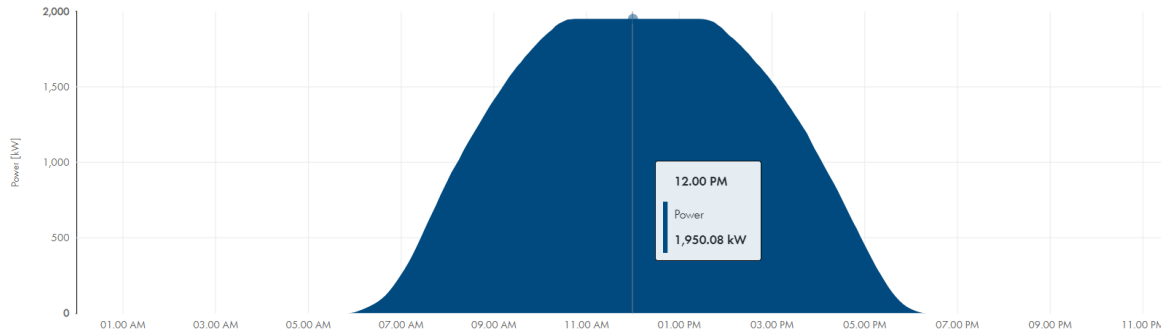
Debido a que los paneles tienen menos de tres años de haber sido fabricados, la degradación que han sufrido es mínima, comparado al final de su vida útil, como puede apreciarse en la Fig. 5.



Fuente: Trina Solar, "Ficha técnica de panel 545W"

Fig. 5. Degradación de paneles solares Trina Solar 545W.

Por cuanto, la generación máxima en DC de los paneles conectados a los inversores aún excede su capacidad máxima de conversión a AC que es de 1,950kW (Fig.6).



Fuente: Sunny Portal, "Dashboard ECON"

Fig. 6. Perfil de potencia durante un día soleado.

Dado que la medición de potencia antes de la implementación de este sistema de monitoreo se encuentra aguas abajo de los inversores, no se percibe una diferencia de la potencia pico alcanzada por los paneles en DC para establecer un parámetro objetivo de baja de desempeño.

Esta condición impulsó la necesidad de tomar mediciones en DC, comparando un panel en las mismas condiciones al resto del parque solar contra uno con limpieza frecuente y así contrastar las potencias simultáneas de días soleados y notar diferencias de desempeño.

## 1.4 METODOLOGÍA

Este trabajo de graduación fue un proyecto de implementación, donde se aplicaron los conocimientos adquiridos en el transcurso de la maestría para darle solución a una problemática real en un contexto industrial.

- Paso 1:

Enlistar los recursos necesarios para realizar una limpieza de paneles y establecer un valor monetario. Como primer acercamiento, se consideró el costo de contratar a una empresa que lave los módulos fotovoltaicos; además del costo de trasladar un camión cisterna para el suministro de agua, ya que no se cuenta con abastecimiento en el parque solar para llenar con agua los tanques de almacenamiento. Este es el punto más al norte y más elevado en el plantel, como se aprecia en la Fig. 7. Este es un recorrido de 1.4km desde la estación de lavado hasta la entrada del parque solar, con un cambio de elevaciones de 20msnm a 125msnm.



Fuente: Google Earth

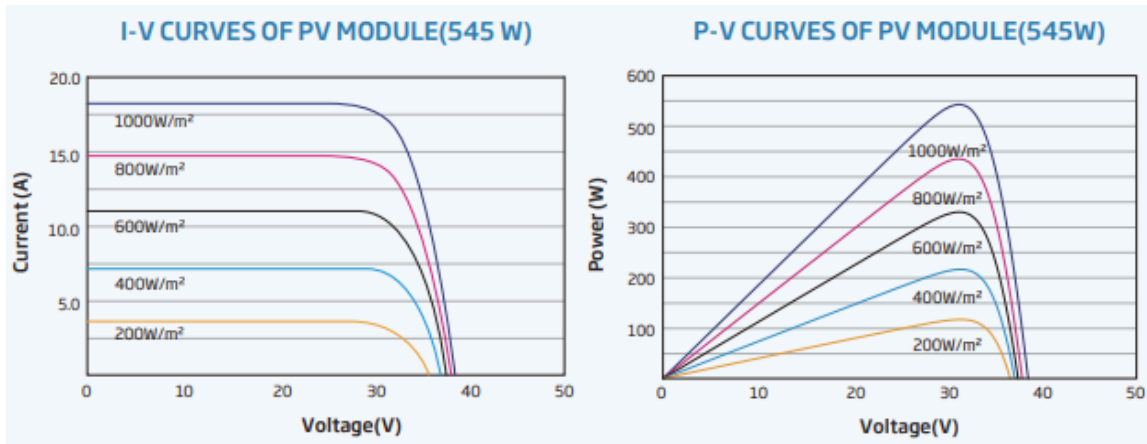
Fig. 7. Recorrido de camión cisterna para abastecimiento de agua.

- Paso 2:

Implementación de la estación de monitoreo. Para esto se realizaron 2 actividades primordiales: la instalación de 2 paneles solares de control, y la conexión del dispositivo de medición a los paneles.

En la primera actividad se desconectaron 2 paneles del parque solar y se reemplazaron con 2 paneles de repuesto que se tenían de reserva. Se busca utilizar paneles que han estado operando junto con el resto de la planta solar para igualar las condiciones de degradación. Esta etapa requirió de una pequeña obra civil para tener bases en el suelo y empernar los paneles a estructuras metálicas con igual inclinación que el resto de la planta solar.

En cuanto al dispositivo de medición, se adquirió un procesador que recibe señales análogas de voltaje y corriente de ambos paneles, hace el cálculo de la potencia y almacena los resultados para realizar la comparación y cálculo de pérdidas. La Fig. 8 describe el comportamiento de los parámetros eléctricos que se estarán monitoreando.



Fuente: Trina Solar, "Ficha técnica de panel 545W"

Fig. 8. Curvas corriente-voltaje y generación-voltaje de paneles Trina Solar 545W.

- Paso 3:

Recopilación de datos de potencia. Se compararon las lecturas de ambos paneles de control y se estableció un porcentaje de pérdida en el panel que no se estaba limpiando. Este valor se relacionó con los días desde el último lavado. Con el contraste de esta información, se trazó una "línea base" para proyectar comportamientos.

- Paso 4:

Evaluación entre el valor económico de la energía no generada y los costos que representa una limpieza del parque solar. Se definió una metodología que sirve como criterio técnico de punto de equilibrio, con el que se podrá estipular el momento oportuno costo-beneficio de realizar futuras limpiezas.

- Paso 5:

Redacción de escrito académico. Entregado y posteriormente expuesto a la Universidad Don Bosco y a La Cantera; esta última con la finalidad de dar respuesta a la problemática del aseo de los módulos fotovoltaicos e iniciar una calendarización que permita optimizar los recursos.

## CAPÍTULO 2.

### INSTALACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE POTENCIAS Y VALORES MEDIDOS

#### 2.1 MEDICIÓN DE POTENCIAS EN PANELES DE CONTROL

Para establecer un parámetro objetivo de comparación entre el rendimiento de un panel solar limpio y uno sucio, se ha partido de la necesidad de obtener valores individuales en DC. Antes de la elaboración de este proyecto, sólo se contaba con mediciones a la salida de los 13 inversores y a la salida del transformador que conecta a la línea de alto voltaje del plantel. Ambos puntos de medición en AC.

La limitante de este parámetro es que la generación de energía de los módulos fotovoltaicos excede la capacidad de conversión de los inversores, por lo que la medición está restringida a 150kW de potencia por inversor; mientras que, si se sobredimensionaran los inversores, se alcanzaría la máxima generación disponible y de esta forma se registraría como la potencia se reduce.

Además, esta metodología está limitada por la disponibilidad del recurso solar, ya que se compararía un día contra el otro, en lugar de comparar condiciones de limpieza entre módulos.

También se consideró monitorear el coeficiente de rendimiento (*Performance Ratio o PR en inglés*), pero el cálculo de este indicador contempla las pérdidas por conversión de corrientes, calentamiento de los módulos solares y las bajas irradiancias al inicio y final del día. Al igual que las mediciones en AC, estas son comparables día con día y no contrastan el cambio de una sola variable manteniendo el resto de condiciones iguales.

La metodología popularmente aplicada en parques solares ubicados en locaciones áridas contempla un medidor de suciedad (*“soiling sensor” en inglés*) que contiene dos celdas fotovoltaicas de igual tecnología, en el mismo ángulo de inclinación y generalmente montados en el mismo dispositivo. Una celda es limpiada manual o automáticamente antes de realizar cada medición, mientras que la otra se mantiene en las mismas condiciones de operación que el parque que está siendo motivo de estudio [2].

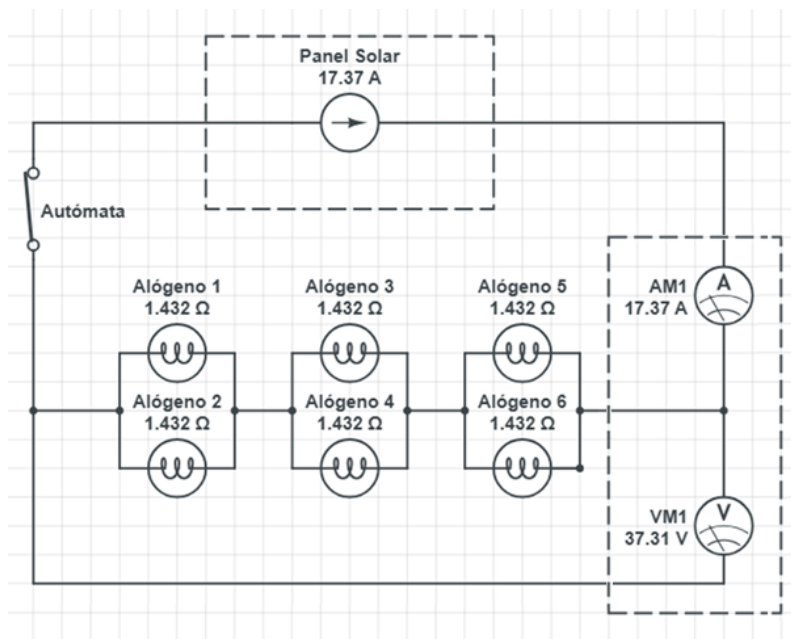
Se ha adaptado la misma técnica, tomando dos paneles solares que estaban funcionando en la planta fotovoltaica para conectarlos a circuitos aislados. Estos circuitos están conformados por 6 alógenos de 100W cada uno, que son los encargados de consumir toda la carga que los paneles de potencia nominal de 545W puedan entregar.



Fuente: Elaboración propia

Fig. 9. Conjunto de alógenos y procesador dentro de cuarto de control.

A este arreglo se le conectó un procesador que contiene un medidor de corriente y un medidor de voltaje, que multiplica estos parámetros dando como resultado la potencia entregada por el panel.



Fuente: Elaboración propia

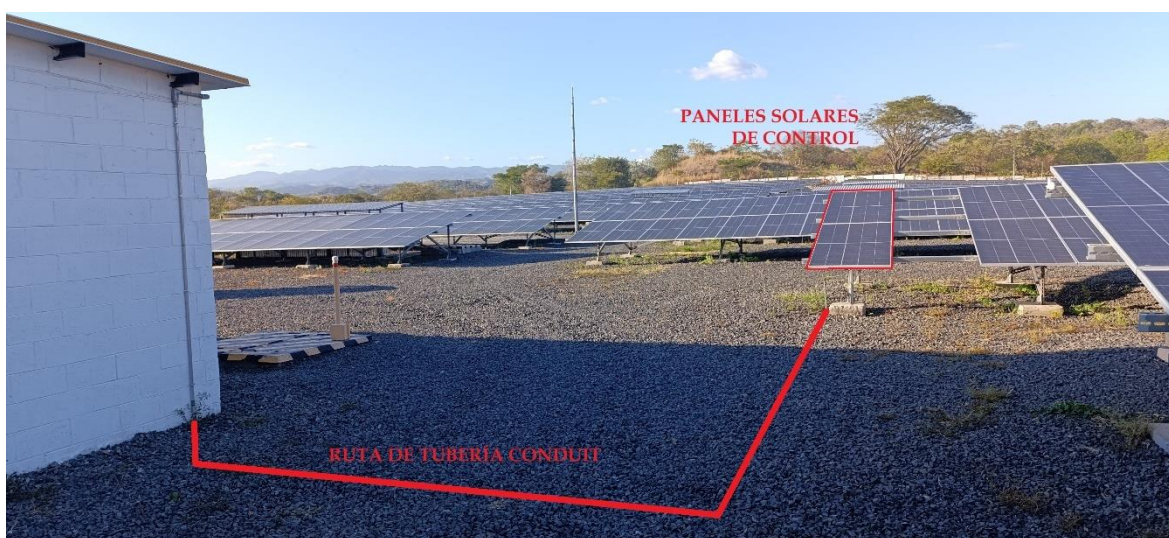
Fig. 10. Diagrama unifilar de estación de monitoreo de potencia en paneles de control.

La lectura espontánea de potencia de ambos circuitos es registrada en una base de datos para, a partir de estos valores, establecer un porcentaje de pérdida entre los paneles de control:

$$P\acute{e}rdida\ de\ potencia = \frac{Potencia_{Panel\ Limpio} - Potencia_{Panel\ Sucio}}{Potencia_{Panel\ Limpio}} \times 100\% \quad (1)$$

En cuanto al montaje mecánico de los paneles, se instalaron bases de concreto en el suelo y perfilaría de acero que permitieran la sujeción de los dos paneles de control en la misma inclinación que el resto de módulos, con la intención de replicar lo más posible las condiciones de operación. El panel superior se mantuvo en las mismas condiciones de limpieza que el resto del parque solar, mientras que el de abajo se limpió antes de cada medición.

Tomando en cuenta las condiciones ambientales a las que estaría expuesto el procesador si se dejara a la intemperie, se decidió conducir el cableado por tubería conduit hasta el cuarto eléctrico, donde están ubicados los alógenos y el procesador, evitando así la exposición del equipo electrónico al polvo y a la lluvia.



Fuente: Elaboración propia

Fig. 11. Paneles de control y recorrido de cables hacia sistema de monitoreo.

## 2.2 REGISTRO DE POTENCIAS EN PANELES DE CONTROL

El sistema de monitoreo se puso en marcha el 30 de enero de 2024. A partir de esta fecha se realizaron 64 lecturas de potencia hasta el 15 de junio del mismo año, que se dio por terminado el tiempo de monitoreo.

Inicialmente, se planeaba que el procesador tomara múltiples lecturas durante el transcurso del día, las promediara y estableciera un valor diario; sin embargo, los alógenos emiten bastante calor y para evitar la necesidad de intercambiarlos constantemente se decidió que se encendería el procesador y se cerraría el circuito de los alógenos de forma manual por unos instantes para recolectar un dato representativo. Una vez obtenidos, se abrirían los circuitos de los paneles y se desenergizaría el procesador.

Durante estos 4 meses y medio se registró fecha, hora, días transcurridos desde la última limpieza, lectura de potencia del panel limpio, lectura de potencia del panel sucio y porcentaje de reducción de potencia del panel sucio en comparación al panel limpio.

Partiendo de que la última limpieza de paneles previo a este monitoreo se completó el 6 de noviembre de 2023, se contaron los días transcurridos. Durante el transcurso de este control se realizó una limpieza adicional finalizada el 9 de marzo de 2024.

Nótese que la limpieza de los 4,710 paneles ubicados en La Cantera San Diego toma un tiempo de ejecución de 5 días, por lo que se considera el último día como la fecha de registro, coincidiendo con la limpieza de ambos paneles de control.

Adviértase también que el módulo de control dista en un máximo de 190 metros con el resto de paneles fotovoltaicos, por lo que se pretende que las mediciones sean altamente representativas, pese a las particularidades de ubicación y desfase de las limpiezas.

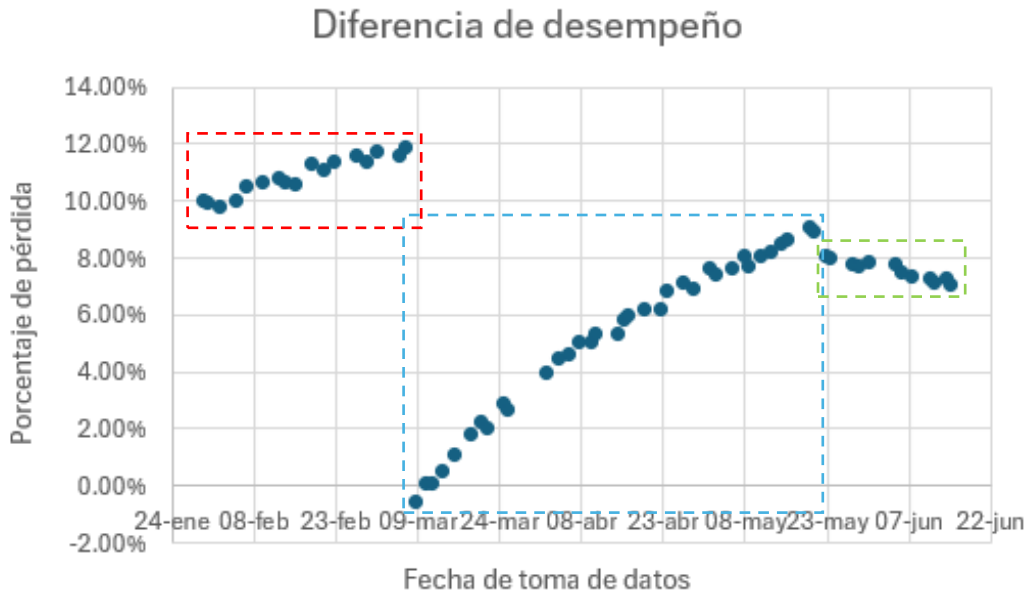
A continuación, se presentan los parámetros recopilados:

Tabla 1. Datos recopilados durante periodo de monitoreo de paneles de control.

| Fecha     | Hora  | Días desde la última limpieza | Potencia panel limpio [W] | Potencia panel sucio [W] | Porcentaje de pérdida |
|-----------|-------|-------------------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 30-ene-24 | 09:55 | 85                            | 400.35                    | 360.62                   | 9.93%                 |
| 31-ene-24 | 15:25 | 86                            | 309.17                    | 278.61                   | 9.88%                 |
| 02-feb-24 | 07:55 | 88                            | 164.09                    | 148.12                   | 9.73%                 |
| 05-feb-24 | 08:50 | 91                            | 292.64                    | 263.52                   | 9.95%                 |
| 07-feb-24 | 10:15 | 93                            | 450.70                    | 403.75                   | 10.42%                |
| 10-feb-24 | 09:20 | 96                            | 377.28                    | 337.38                   | 10.57%                |
| 13-feb-24 | 14:55 | 99                            | 342.10                    | 305.43                   | 10.72%                |
| 14-feb-24 | 15:50 | 100                           | 278.31                    | 248.78                   | 10.61%                |
| 16-feb-24 | 11:35 | 102                           | 430.33                    | 385.00                   | 10.53%                |
| 19-feb-24 | 07:35 | 105                           | 112.60                    | 99.98                    | 11.21%                |
| 21-feb-24 | 16:10 | 107                           | 250.58                    | 222.98                   | 11.01%                |

|           |       |     |        |        |        |
|-----------|-------|-----|--------|--------|--------|
| 23-feb-24 | 13:25 | 109 | 426.57 | 378.33 | 11.31% |
| 27-feb-24 | 09:10 | 113 | 352.42 | 311.86 | 11.51% |
| 29-feb-24 | 11:10 | 115 | 434.95 | 385.82 | 11.29% |
| 02-mar-24 | 10:35 | 117 | 433.64 | 382.96 | 11.69% |
| 06-mar-24 | 09:25 | 121 | 315.73 | 279.29 | 11.54% |
| 07-mar-24 | 16:10 | 122 | 214.71 | 189.41 | 11.78% |
| 09-mar-24 | 10:45 | 0   | 403.90 | 406.39 | -0.62% |
| 11-mar-24 | 14:50 | 2   | 308.98 | 309.00 | -0.01% |
| 12-mar-24 | 16:00 | 3   | 199.05 | 199.07 | -0.01% |
| 14-mar-24 | 14:50 | 5   | 272.60 | 271.31 | 0.47%  |
| 16-mar-24 | 07:45 | 7   | 129.21 | 127.85 | 1.05%  |
| 19-mar-24 | 11:50 | 10  | 290.44 | 285.33 | 1.76%  |
| 21-mar-24 | 15:20 | 12  | 257.25 | 251.63 | 2.18%  |
| 22-mar-24 | 12:30 | 13  | 336.02 | 329.37 | 1.98%  |
| 25-mar-24 | 11:20 | 16  | 402.55 | 391.08 | 2.85%  |
| 26-mar-24 | 14:40 | 17  | 340.15 | 331.36 | 2.58%  |
| 02-abr-24 | 10:00 | 24  | 327.83 | 315.01 | 3.91%  |
| 04-abr-24 | 10:25 | 26  | 357.83 | 342.05 | 4.41%  |
| 06-abr-24 | 08:10 | 28  | 197.59 | 188.61 | 4.55%  |
| 08-abr-24 | 14:30 | 30  | 378.21 | 359.31 | 5.00%  |
| 10-abr-24 | 09:25 | 32  | 196.73 | 186.97 | 4.96%  |
| 11-abr-24 | 14:45 | 33  | 305.81 | 289.77 | 5.25%  |
| 15-abr-24 | 10:35 | 37  | 431.64 | 408.75 | 5.30%  |
| 16-abr-24 | 16:25 | 38  | 153.30 | 144.47 | 5.76%  |
| 17-abr-24 | 15:55 | 39  | 229.49 | 215.93 | 5.91%  |
| 20-abr-24 | 11:05 | 42  | 166.69 | 156.46 | 6.14%  |
| 23-abr-24 | 15:30 | 45  | 285.42 | 267.82 | 6.17%  |
| 24-abr-24 | 08:10 | 46  | 260.24 | 242.53 | 6.80%  |
| 27-abr-24 | 10:00 | 49  | 377.50 | 350.88 | 7.05%  |
| 29-abr-24 | 08:25 | 51  | 347.63 | 323.86 | 6.84%  |
| 02-may-24 | 12:25 | 54  | 398.17 | 367.96 | 7.59%  |
| 03-may-24 | 15:10 | 55  | 288.62 | 267.43 | 7.34%  |
| 06-may-24 | 11:45 | 58  | 402.65 | 372.09 | 7.59%  |
| 08-may-24 | 08:35 | 60  | 243.46 | 224.07 | 7.96%  |
| 09-may-24 | 14:02 | 61  | 372.50 | 344.00 | 7.65%  |
| 11-may-24 | 07:20 | 63  | 115.43 | 106.23 | 7.97%  |
| 13-may-24 | 15:50 | 65  | 95.40  | 87.62  | 8.15%  |
| 15-may-24 | 11:45 | 67  | 403.06 | 369.15 | 8.41%  |
| 16-may-24 | 13:35 | 68  | 430.05 | 393.27 | 8.55%  |
| 20-may-24 | 09:30 | 72  | 285.17 | 259.52 | 9.00%  |
| 21-may-24 | 16:20 | 73  | 141.46 | 128.92 | 8.86%  |
| 23-may-24 | 07:25 | 75  | 123.63 | 115.16 | 8.01%  |
| 24-may-24 | 08:10 | 76  | 78.08  | 72.78  | 7.94%  |
| 28-may-24 | 15:40 | 80  | 249.67 | 233.24 | 7.70%  |
| 29-may-24 | 10:30 | 81  | 361.03 | 337.54 | 7.62%  |
| 31-may-24 | 11:10 | 83  | 413.83 | 386.15 | 7.78%  |
| 05-jun-24 | 14:20 | 88  | 357.72 | 334.01 | 7.68%  |
| 06-jun-24 | 16:05 | 89  | 164.83 | 154.27 | 7.45%  |
| 08-jun-24 | 09:10 | 91  | 321.29 | 301.24 | 7.28%  |
| 11-jun-24 | 14:50 | 94  | 314.53 | 295.14 | 7.18%  |
| 12-jun-24 | 13:55 | 95  | 370.86 | 348.53 | 7.03%  |
| 14-jun-24 | 07:45 | 97  | 110.72 | 103.80 | 7.24%  |
| 15-jun-24 | 10:15 | 98  | 66.52  | 62.51  | 7.02%  |

Fuente: Elaboración propia

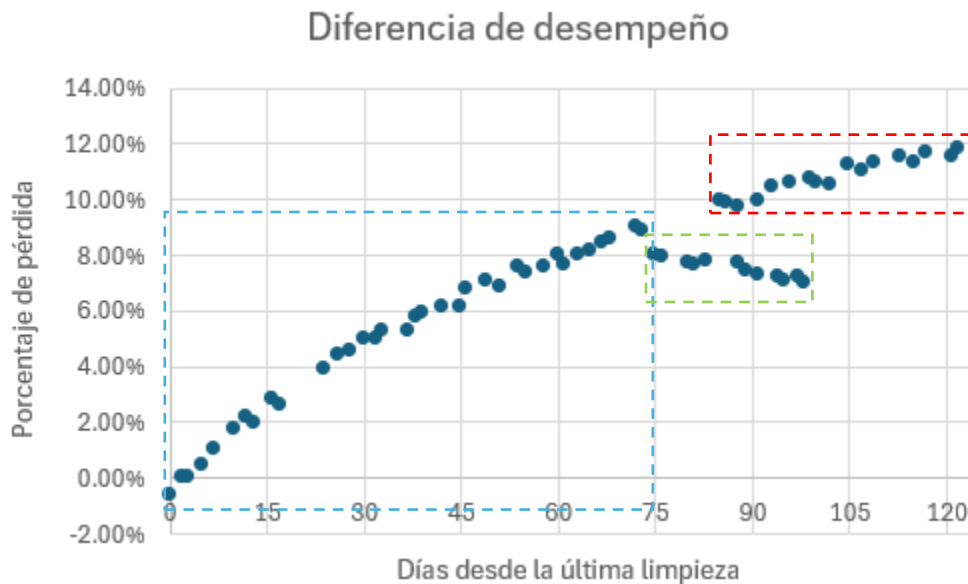


Fuente: Elaboración propia

Fig. 12. Gráfica de porcentaje de pérdida contra fecha de toma de datos.

En la gráfica anterior se identifican 3 bloques de datos: del 30 de enero al 7 de marzo (encerrado en rojo), del 9 de marzo al 21 de mayo (encerrado en celeste) y del 23 de mayo al 15 de junio (encerrado en verde).

De esta forma, se percibe una discontinuidad en los bloques, por lo que se presentan en la Fig. 13 según la cantidad de días desde la última limpieza.

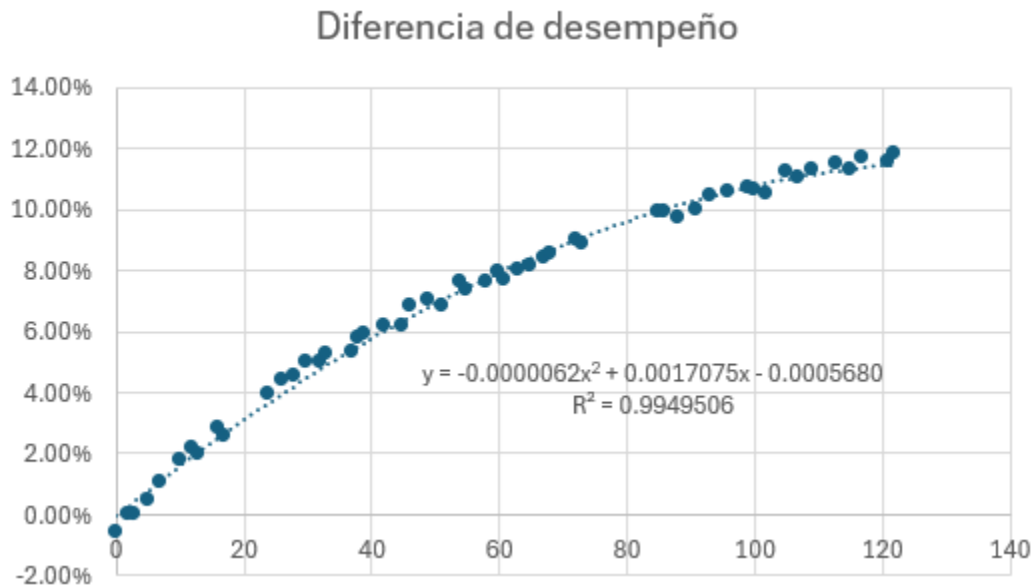


Fuente: Elaboración propia

Fig. 13. Gráfica de porcentaje de pérdida contra días desde la última limpieza.

El bloque encerrado en verde presenta una desviación a la tendencia del resto de datos debido al inicio de las lluvias, por lo que se limitó el estudio a los 52 datos obtenidos durante la época seca, contenidos entre el 30 de enero al 21 de mayo.

Omitiendo los datos obtenidos durante la temporada de lluvia, los datos restantes se presentan graficados a continuación:



Fuente: Elaboración propia

Fig. 14. Gráfica depurada de diferenciad de desempeño.

El comportamiento de las pérdidas de potencia se describe según la ecuación

$$p(x) = 0.0000062x^2 + 0.0017075x - 0.0005680 \quad (2)$$

Siendo “x” la cantidad de días transcurridos desde la última limpieza.

Se ha incluido una línea de tendencia cuadrática, ya que se asemeja muy bien a la realidad, al tener un coeficiente  $R^2$  de 0.9949. A partir de esta ecuación es que se calculará un parámetro que indique la necesidad de limpieza en la planta solar.

## CAPÍTULO 3.

### COSTO ECONÓMICO DE UNA LIMPIEZA DE PANELES SOLARES Y DE LA ENERGÍA NO SERVIDA

#### 3.1 VALOR ECONÓMICO DE LA LIMPIEZA DE LOS PANELES SOLARES

La limpieza de los paneles solares es una práctica necesaria para garantizar la buena operación de un parque fotovoltaico; sin embargo, es una tarea que puede representar un costo equivalente a varios días de operación, por lo que se estima conveniente contar con un parámetro objetivo y fundamentado para determinar la necesidad de limpieza.

Si bien suele ser un atractivo para las visitas conocer una planta solar y puede ser mal visto que los módulos fotovoltaicos estén visiblemente sucios, existe un **criterio monetario y técnico** que indique el momento más adecuado para hacer este despliegue de recursos y obtener el mayor beneficio económico.

Para esto, es fundamental establecer 2 variables principales para encontrar un punto de equilibrio: el costo de lavar los paneles solares y el valor de la energía que se deja de generar por una baja de rendimiento.

Hasta el momento, la limpieza de los paneles solares se está realizando por la empresa que brinda los servicios de O&M de la planta fotovoltaica, ya que se ha incluido como parte del contrato. Al proponer realizar esta actividad con personal propio de La Cantera, la gerencia ha preferido mantenerla tercerizada, ya que no hay interés en destinar recursos económicos ni humanos para el desarrollo de esta tarea.

Siendo así los únicos costos la movilización de un camión cisterna para el abastecimiento de agua, el salario del motorista de la pipa y el pago de la limpieza a la empresa de O&M.

Para dimensionar el volumen de agua requerido, se estima el uso de 8.5 litros de agua por cada panel solar [3] que se requiera limpiar. Siendo 4,710 paneles en la planta fotovoltaica, se requieren aproximadamente 40,000 litros de agua, equivalentes a un poco más de 10,500 galones. A esta cantidad de agua no se le asignará ningún costo, ya que es desviada del Río San Antonio y no se paga a ninguna entidad por el uso del recurso hídrico.

El tanque del camión cisterna tiene una capacidad nominal de 3,000 galones. Sin embargo, siempre hay pérdidas de volumen por las fugas en el tanque. Basado en experiencias anteriores, se requieren 4 viajes para suministrar el agua suficiente para limpiar la planta solar completa.

Un recorrido realizado por la pipa, considerando el trayecto de ida, las maniobras dentro de la planta solar y el trayecto de vuelta, ronda los 3.5km; totalizando 14 km para completar esta

tarea. Estableciendo un costo de combustible, desgastables y depreciación del equipo de \$0.50 por kilómetro recorrido.

En cuanto al costo que tiene el tiempo utilizado por el operador del camión cisterna, se ha tomado el sueldo promedio de las 3 personas que desempeñan este puesto, devengando \$513.23 mensuales. A este monto se le sobrecarga el 8.75% del sueldo como importe a la AFP y un 7.5% adicional en concepto de importe al ISSS por parte del empleador; resultando en un costo total de \$596.63 mensual para la empresa contar con los servicios de un operador de camión cisterna.

El llenado de los tanques toma un tiempo estimado de 1 hora y 15 minutos desde el llenado de la pipa, pasando por el recorrido, vaciado del agua, hasta su llegada a la estación de lavado. Considerando que se requieren 4 recorridos para completar la limpieza total de la planta fotovoltaica, se dedica un total de 5 horas por parte del motorista.

A todos los colaboradores de La Cantera se les reconocen en su sueldo un total de 8 horas diarias (ya sean trabajadas o de descanso) por 30 días en el mes, por cuanto se les pagan un total de 240 horas mensuales. Con esa jornada, una hora laborada por el operador del camión cisterna tiene un costo de \$2.49 para la empresa.

Finalmente, el costo de subcontratar a la empresa de O&M para realizar una limpieza extraordinaria fuera de lo establecido en el contrato es de \$0.55 + IVA por cada panel [Anexo 1]. La planta fotovoltaica de La Cantera, Platel San Diego posee 4710 paneles en operación.

Tabla 2. Costos de limpieza de módulos fotovoltaicos de parque solar.

| <b>Categoría</b>    | <b>Descripción</b>                    | <b>Cantidad</b> | <b>Costo Unitario</b> | <b>Subtotal</b>   | <b>Comentarios</b>                |
|---------------------|---------------------------------------|-----------------|-----------------------|-------------------|-----------------------------------|
| Insumos             | Agua para limpieza                    | 40,000 Litros   | \$0.00                | \$0.00            | Agua disponible sin costo directo |
| Transporte de Agua  | Depreciación de camión cisterna       | 4 viajes        | \$1.75                | \$7.00            | Costo por disponibilidad de agua  |
| Recurso Humano      | Sueldo de operador de camión cisterna | 5 horas         | \$2.49                | \$12.45           | Basado en salario promedio        |
| Limpieza de Paneles | Subcontrato de empresa de O&M         | 4,710 paneles   | \$0.65                | \$2,927.27        | Según cotización anexa            |
| <b>TOTAL</b>        |                                       |                 |                       | <b>\$2,946.72</b> |                                   |

Fuente: Elaboración propia

Totalizando el costo de transportar el agua, el personal interno y la contratación de una empresa para la limpieza de paneles, se presupuestan \$2,946.72 por cada ciclo de limpieza completado.

### 3.2 ESTIMACIÓN DE LA ENERGÍA GENERADA EN PERIODO DE CONTROL

Para calcular la energía generada en óptimas condiciones en el transcurso del año, se ingresaron los parámetros de diseño de la planta solar al Sistema de Información Geográfico fotovoltaico (popularmente conocido como “*PV GIS*” por sus siglas en inglés): Potencia pico instalada de 2,566.95kWp, inclinación de 13° hacia el sur y pérdidas de energía del 14%.

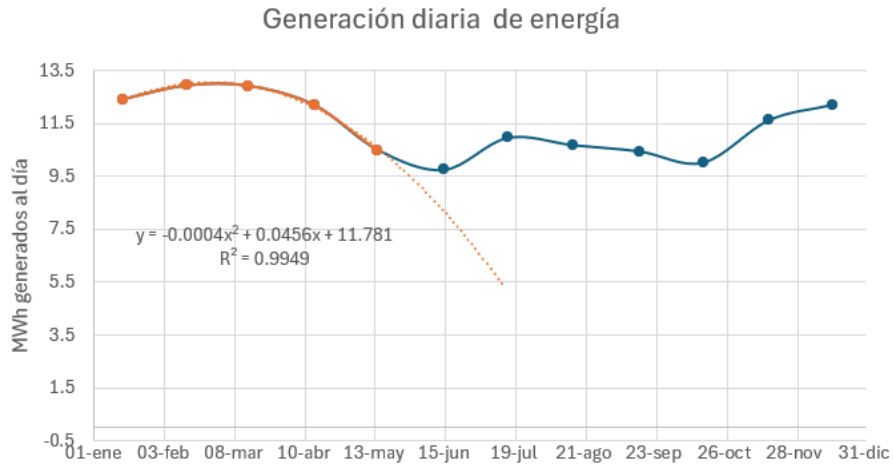
Con estos indicadores, se ha obtenido la generación anual distribuida en los meses y esta se ha dividido en la cantidad de días del mes, para obtener la generación promedio diaria.

Tabla 3. Generación teórica de energía mensual y diaria para 2,566.95kWp.

| Mes        | Días en el mes | Energía mensual [MWh] | Energía diaria [MWh] |
|------------|----------------|-----------------------|----------------------|
| Enero      | 31             | 384.88                | 12.42                |
| Febrero    | 28             | 362.07                | 12.93                |
| Marzo      | 31             | 400.42                | 12.92                |
| Abril      | 30             | 365.86                | 12.20                |
| Mayo       | 31             | 325.37                | 10.50                |
| Junio      | 30             | 292.43                | 9.75                 |
| Julio      | 31             | 339.53                | 10.95                |
| Agosto     | 31             | 330.96                | 10.68                |
| Septiembre | 30             | 313.38                | 10.45                |
| Octubre    | 31             | 310.67                | 10.02                |
| Noviembre  | 30             | 348.52                | 11.62                |
| Diciembre  | 31             | 378.12                | 12.20                |

Fuente: Elaboración propia

Para modelar estos datos en una ecuación, se ha considerado que la lectura de energía diaria corresponde al valor medio de cada mes, es decir al día 15. Ya que las lecturas de porcentaje de pérdida que se utilizarán van del 30 de enero al 21 de mayo, se modelarán los primeros 5 meses del año, utilizando el valor de las abscisas el correlativo del día en el año.



Fuente: Elaboración propia

Fig. 15. Gráfica de generación diaria de energía.

Por cuanto se modelará la energía generada en cada día según la ecuación

$$g(w) = -0.0004w^2 + 0.0456w + 11.781 \text{ [MWh]} \quad (3)$$

Se utilizó la letra  $w$  para distinguir los días después de la última limpieza ( $x$ ) con el día del año, ya que los inicios de las sucesiones no coinciden.

Tras establecer un modelo de cálculo de energía generada en el día, se calcula ese valor.

Tabla 4. Energía teórica generada en los días de control.

| Fecha  | Día del año | Energía generada al día [MWh] |
|--------|-------------|-------------------------------|
| 30-ene | 30          | 12.79                         |
| 31-ene | 31          | 12.81                         |
| 02-feb | 33          | 12.85                         |
| 05-feb | 36          | 12.90                         |
| 07-feb | 38          | 12.94                         |
| 10-feb | 41          | 12.98                         |
| 13-feb | 44          | 13.01                         |
| 14-feb | 45          | 13.02                         |
| 16-feb | 47          | 13.04                         |
| 19-feb | 50          | 13.06                         |
| 21-feb | 52          | 13.07                         |
| 23-feb | 54          | 13.08                         |
| 27-feb | 58          | 13.08                         |
| 29-feb | 60          | 13.08                         |
| 02-mar | 62          | 13.07                         |
| 06-mar | 66          | 13.05                         |
| 07-mar | 67          | 13.04                         |

|        |     |       |
|--------|-----|-------|
| 09-mar | 69  | 13.02 |
| 11-mar | 71  | 13.00 |
| 12-mar | 72  | 12.99 |
| 14-mar | 74  | 12.97 |
| 16-mar | 76  | 12.94 |
| 19-mar | 79  | 12.89 |
| 21-mar | 81  | 12.85 |
| 22-mar | 82  | 12.83 |
| 25-mar | 85  | 12.77 |
| 26-mar | 86  | 12.74 |
| 02-abr | 93  | 12.56 |
| 04-abr | 95  | 12.50 |
| 06-abr | 97  | 12.44 |
| 08-abr | 99  | 12.38 |
| 10-abr | 101 | 12.31 |
| 11-abr | 102 | 12.27 |
| 15-abr | 106 | 12.12 |
| 16-abr | 107 | 12.08 |
| 17-abr | 108 | 12.04 |
| 20-abr | 111 | 11.91 |
| 23-abr | 114 | 11.78 |
| 24-abr | 115 | 11.74 |
| 27-abr | 118 | 11.59 |
| 29-abr | 120 | 11.49 |
| 02-may | 123 | 11.34 |
| 03-may | 124 | 11.29 |
| 06-may | 127 | 11.12 |
| 08-may | 129 | 11.01 |
| 09-may | 130 | 10.95 |
| 11-may | 132 | 10.83 |
| 13-may | 134 | 10.71 |
| 15-may | 136 | 10.58 |
| 16-may | 137 | 10.52 |
| 20-may | 141 | 10.26 |
| 21-may | 142 | 10.19 |

Fuente: Elaboración propia

### 3.3 VALOR MONETARIO DE LA ENERGÍA NO GENERADA

Como se mencionó al inicio de este capítulo, la segunda variable principal para encontrar un punto de equilibrio es el costo de la energía que se deja de generar por una baja de rendimiento.

El incremento sustancial de la producción de agregados pétreos en el Plantel San Diego en el segundo semestre de 2024 ha significado que el consumo de energía de la red sobrepase los excedentes inyectados a la distribuidora; por lo tanto, toda la energía que no se genere en la planta fotovoltaica tendrá que ser comprada a la red.

Bajo las nuevas disposiciones del precio de la energía trimestral (PEt), en donde el pliego tarifario ha estado congelado desde mayo de 2024 a enero de 2025, se tomará el valor de la energía para grandes clientes correspondiente a DelSur, siendo la tarifa vigente al momento de la elaboración de este documento de \$0.153495/kWh. Se utilizó el bloque horario de resto que va de 5:00 a 17:59, ya que la inmensa mayoría de la generación de energía por recurso fotovoltaico transcurre durante esa franja horaria.

Habiendo establecido ya el porcentaje de pérdida de energía diario por falta de limpieza, la energía generada al día durante el periodo de estudio y el precio de la energía facturado por la distribuidora, se calcula el valor de la energía no generada a partir de la siguiente expresión:

$$Valor_{Energía\ no\ generada} = \% \text{ de pérdida} \times Energía\ teórica \times Precio\ de\ la\ energía \quad (4)$$

$$Valor_{Energía\ no\ generada} = p_{(x)} \times g_{(w)} \times PEt \quad (4.1)$$

Donde:

$$p_{(x)} = -0.0000062x^2 + 0.0017075x + 0.0005680 \quad (2)$$

$$g_{(w)} = -0.0004w^2 + 0.0456w + 11.781 [MWh] \quad (3)$$

$$PEt = \$0.153495/kWh \text{ o } \$153.495/MWh \quad (5)$$

Para simplificar el cálculo, se utilizará una sola variable, normalizando el valor  $w$  en función de los días desde la última limpieza  $x$ :

$$w = (x + L) \quad (6)$$

Donde  $L$  es el día del año de la finalización de la limpieza, por lo que se reescribe la ecuación:

$$g_{(w)} = -0.0004(x + L)^2 + 0.0456(x + L) + 11.781 [MWh] \quad (3.1)$$

$$g_{(w)} = -0.0004x^2 - 0.0008xL - 0.0004L^2 + 0.0456x + 0.0456L + 11.781 [MWh] \quad (3.2)$$

En este punto, es conveniente sustituir el valor  $L$  por el día del año de la finalización de la limpieza, para sustituir una incógnita por una constante y reducir la complicación algebraica del caso de estudio.

Para el escenario que se está evaluando, la limpieza se realizó el 9 de marzo de 2024, que corresponde al día 69 del año, por lo que sustituimos  $L$  por 69 en la ecuación normalizada de días desde la última limpieza:

$$g_{(w)} = -0.0004x^2 - 0.0008x(69) - 0.0004L^2 + 0.0456x + 0.0456(69) + 11.781 \quad (3.3)$$

$$g_{(w)} = -0.0004x^2 - 0.0096x + 13.023 \text{ [MWh]} \quad (3.4)$$

Tras resuelta el álgebra de la expresión anterior, reescribimos la ecuación que modela el valor de la energía no generada por la falta de limpieza:

$$\text{Valor}_{\text{Energía no generada}} = p(x) \times g(x) \times PEt \quad (4.2)$$

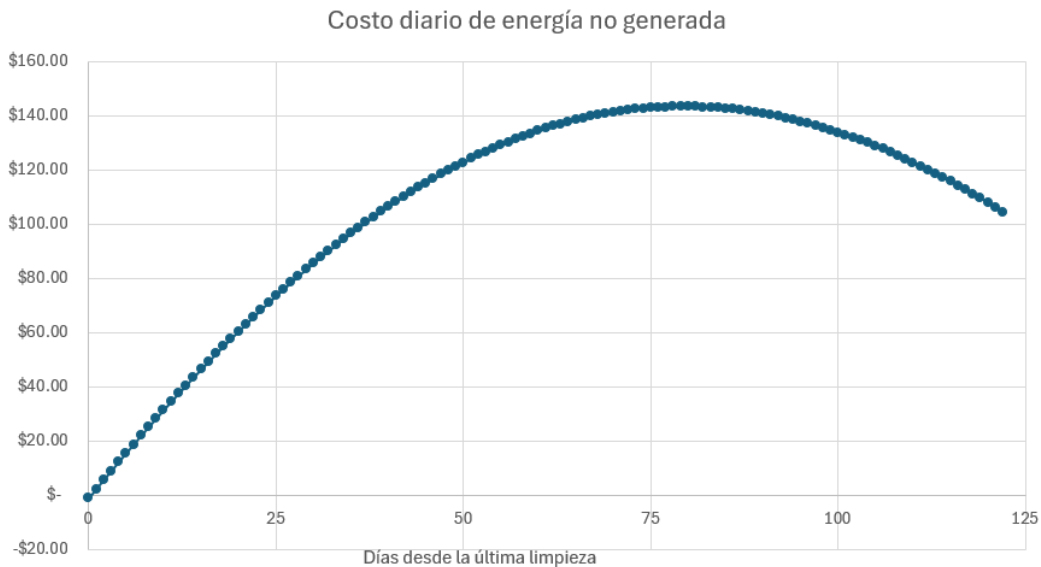
$$\text{Valor}_{\text{Energía no generada}} = \quad (4.3)$$

$$(-0.0000062x^2 + 0.0017075x + 0.0005680) \times (-0.0004x^2 - 0.0096x + 13.023) \times \$153.495/\text{MWh}$$

$$\text{Valor}_{\text{Energía no generada}} = \quad (4.4)$$

$$3.806676 \times 10^{-7}x^4 - 9.57010 \times 10^{-5}x^3 - 1.48748 \times 10^{-2}x^2 + 3.41407x - 1.13541 \text{ [\$]}$$

Esta función graficada se visualiza de la siguiente manera:



Fuente: Elaboración propia

Fig. 16. Gráfica costo de la energía no generada por falta de limpieza.

## CAPÍTULO 4

### MODELO TÉCNICO-ECONÓMICO PARA ENCONTRAR EL PUNTO DE EQUILIBRIO DEL PERIODO ENTRE CICLOS DE LIMPIEZA

#### 4.1 METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE VARIABLE RELEVANTE

Para establecer el día óptimo de limpieza de paneles, se debe encontrar la forma de relacionar el valor de la limpieza del parque fotovoltaico con el costo extra de energía eléctrica que significará no producir energía a causa de los particulados depositados sobre los paneles solares.

En un primer acercamiento, podría pensarse que el momento ideal es cuando la sumatoria de las pérdidas diarias de los días ya transcurridos sea equivalente al costo de la limpieza, pero esta metodología no contempla el rendimiento de los días siguientes y se enfoca en sobrecostos que ya no se pueden revertir.

En su lugar, se busca igualar el costo de la limpieza con el valor acumulado de la energía no generada comprendida entre dos intervalos de tiempo siendo uno el doble que el otro, como se muestra en la Fig. 17. Este enfoque permite anticipar la energía no generada a futuro si no se hiciera la limpieza, y comparar la con la no generada en un intervalo igual al ya transcurrido haciendo la limpieza en ese momento; y a partir de esa diferencia, establecer el valor de energía que se perdería entre ciclos.

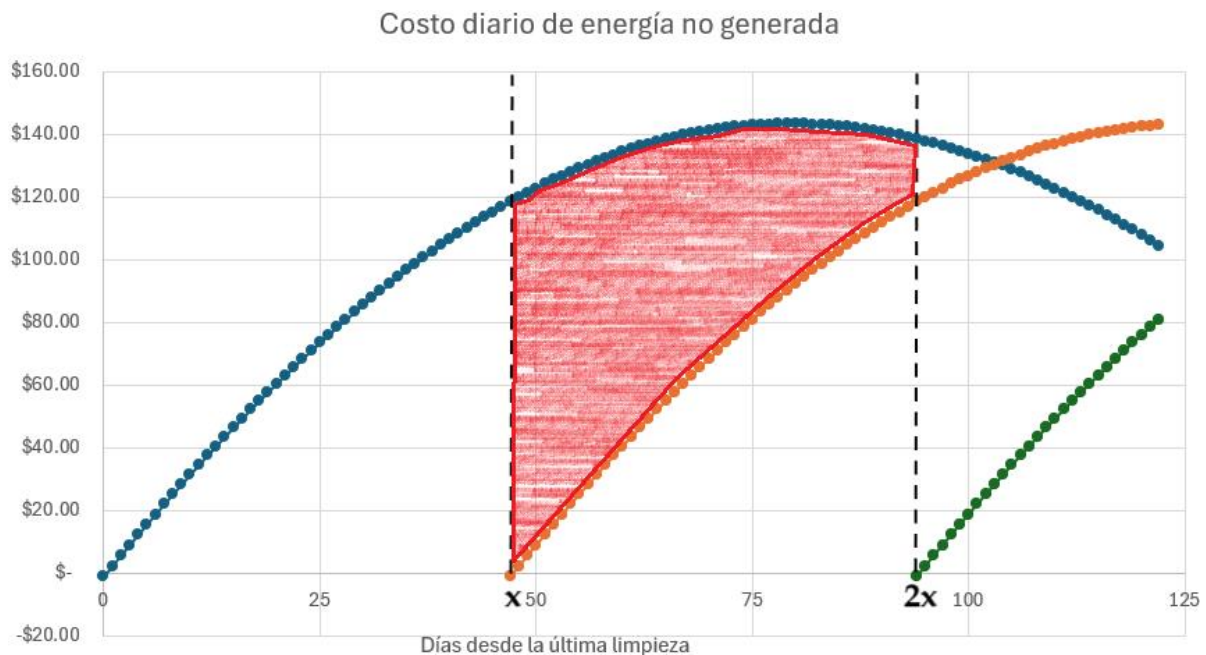


Fig. 17. Gráfica del valor de la energía no generada comprendida entre ciclos de limpieza.

Debe considerarse que en los límites de integración en el modelo de la segunda limpieza (en anaranjado) son distintos entre las funciones de pérdida y energía generada, ya que el modelado de las pérdidas de energía vuelve a partir de cero y no de “x”. Para cumplir con esta condición, se realiza un arreglo algebraico a la función  $g(x)$  para desplazarla  $x$  unidades a la derecha y hacer coincidir los límites de integración a la función  $p(x)$  evaluados de cero a  $x$  días, equivalentes al primer periodo de limpieza.

$$g(x)_{ajustada} = -0.0028x^2 - 0.0288x + 13.023 \quad (7)$$

Para calcular las pérdidas con el nuevo ciclo de limpieza, se utiliza la expresión:

$$Valor_{Energía\ no\ generada\ postlimpieza} = p(x) \times g(x) \times PEt \quad (8)$$

$$Valor_{Energía\ no\ generada\ postlimpieza} = (-0.0000062x^2 + 0.0017075x + 0.0005680) \times (-0.0028x^2 - 0.0288x + 13.023) \times \$153.495/MWh \quad (8.1)$$

$$Valor_{Energía\ no\ generada} = 2.6647 \times 10^{-6}x^4 - 7.0645 \times 10^{-4}x^3 - 1.9698 \times 10^{-2}x^2 + 3.41574x - 1.13541 \quad (8.2)$$

Esta última expresión algebraica permite modelar el costo económico que representa la falta de limpieza partiendo de un nuevo ciclo. De esta forma, se compararán las pérdidas en caso de no realizar la limpieza y luego de haberla realizado. La diferencia entre ambas representa un ahorro hipotético que se comparará al costo de la limpieza para encontrar un punto de equilibrio.

## 4.2 ANÁLISIS DE DATOS

Tras ajustar los modelos para mantener los mismos límites de integración entre periodos, la ecuación que expresa las pérdidas monetarias que se evitarán con hacer la limpieza igualada a los costos de lavar los paneles será:

$$\int_x^{2x} Valor_{Energía\ no\ generada} - \int_0^x Valor_{Energía\ no\ generada\ postlimpieza} = Costo\ de\ limpieza \quad (9)$$

Desarrollando la ecuación por partes:

$$\int_x^{2x} Valor_{Energía\ no\ generada} \quad (9.1.1)$$

$$\int_x^{2x} 3.806676 \times 10^{-7}x^4 - 9.57010 \times 10^{-5}x^3 - 1.48748 \times 10^{-2}x^2 + 3.41407x - 1.13541 \quad dx \quad (9.1.2)$$

$$2.36014 \times 10^{-6}x^5 - 3.58871 \times 10^{-4}x^4 - 3.37689 \times 10^{-2}x^3 + 5.12059x^2 - 1.13541x \quad (9.1.3)$$

$$\int_0^x \text{Valor}_{\text{Energía no generada postlimpieza}} \quad (9.2.1)$$

$$\int_0^x 2.6647 \times 10^{-6}x^4 - 7.0645 \times 10^{-4}x^3 - 1.9698 \times 10^{-2}x^2 + 3.41574x - 1.13541 \, dx \quad (9.2.2)$$

$$5.32935 \times 10^{-7}x^5 - 1.76612 \times 10^{-4}x^4 - 6.5660 \times 10^{-3}x^3 + 1.70787x^2 - 1.13541 \quad (9.2.3)$$

$$\int_x^{2x} \text{Valor}_{\text{Energía no generada}} - \int_0^x \text{Valor}_{\text{Energía no generada postlimpieza}} \quad (9.3.1)$$

$$1.82721 \times 10^{-6}x^5 - 1.82259 \times 10^{-4}x^4 - 2.72029 \times 10^{-2}x^3 + 3.41272x^2 \quad (9.3.2)$$

$$\int_x^{2x} \text{Valor}_{\text{Energía no generada}} - \int_0^x \text{Valor}_{\text{Energía no generada postlimpieza}} = \text{Costo de limpieza} \quad (9)$$

$$1.82721 \times 10^{-6}x^5 - 1.82259 \times 10^{-4}x^4 - 2.72029 \times 10^{-2}x^3 + 3.41272x^2 = \$2,946.72 \quad (9.4)$$

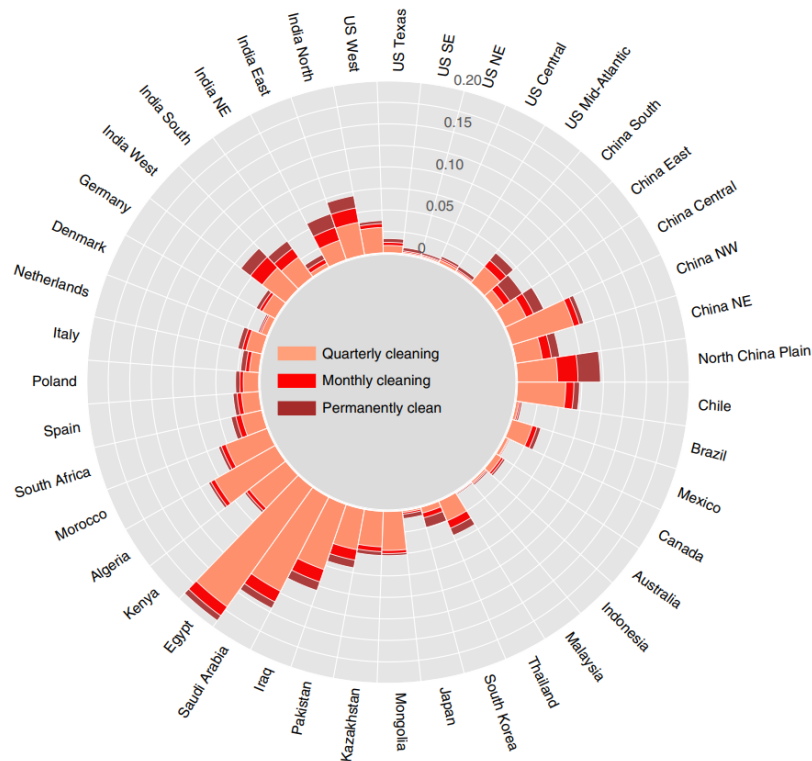
### **$x = 35.90 \therefore$ Ciclos de limpieza de 36 días**

Los parámetros de frecuencia de limpieza para parques solares suele depender de varios factores propios de cada proyecto, como el precio de la energía no servida, cantidad de particulado en el aire e incluso el ángulo de inclinación de los módulos solares [4], lo que genera una amplio espectro de respuestas en las literaturas [5].

El desarrollo de esta investigación ha partido de trabajos académicos previamente elaborados en países áridos, en su mayoría ubicados en el medioriente, con ciclos de limpieza cercanos a 2 semanas. Sabiendo que la práctica común en El Salvador es de asear los paneles cada 2 o 3 meses en época seca y una vez durante la época lluviosa para proyectos en esquema UPR, ciclos de 2 semanas parecían excesivos.

Este estudio se ejecutó porque se reconocían condiciones distintas a las convencionales en el país y se pretendía obtener resultados que redujeran drásticamente los intervalos de aseo de forma económicamente justificada.

La Fig. 18 muestra que en los países de América, la recuperación de energía no es tan significativa al mantener aseados los paneles solares; sin embargo, los porcentajes de pérdida alcanzados en este estudio después de 4 meses sin limpieza se asemejan más a los países de África.



Fuente: Li, X., Mauzerall, D., Bergin, M., Global reduction of solar power generation efficiency due to aerosols and panel soiling.

Fig. 18. Gráfica de recuperación de generación resultante de la limpieza de paneles solares en varias regiones del mundo.

El resultado aquí expuesto justifica incrementar la cantidad de limpiezas durante la época seca con el objetivo de aprovechar al máximo el potencial fotovoltaico, ya que el valor monetario de las pérdidas de energía por exceso de particulados en la superficie de los módulos solares no son despreciables.

Mantener ciclos de limpieza de 5 semanas en época seca (de noviembre a abril) implicaría asear la planta solar 5 veces durante ese periodo, sobrepasando las 2 limpiezas anuales contratadas y excediendo las 2 o 3 limpiezas que comúnmente se recomiendan para proyectos en El Salvador.

Es importante recalcar que los 36 días calculados se establecen a partir de un costo de casi \$3,000 por ciclo de limpieza. En caso que se lograra tener alternativas más económicas, se justificaría asear los paneles con mayor frecuencia.

## CAPÍTULO 5.

### CONCLUSIONES

- Si bien el PR es un indicador globalmente aceptado en el rubro para conocer el rendimiento de un parque fotovoltaico, la medición de potencia en AC tomada de los paneles de control es más precisa para determinar el impacto de la suciedad en la planta solar.
- La sección 3.1 detalla que prácticamente la totalidad del costo de limpieza es atribuida al pago de mano de obra a la empresa de O&M; por cuanto, se deberían asear los módulos fotovoltaicos con recursos propios, así se reducirá considerablemente el costo de esta tarea y permitirá recuperar su valor en intervalos de tiempo más breves, impulsando las limpiezas con mayor frecuencia.
- La limpieza de cada panel en la planta solar de La Cantera, San Diego tiene un valor de aproximado \$6.46/MWh producido; es decir, que el 4.2% del valor de la energía producida deberá ser direccionado a aprovisionar para la limpieza de paneles.
- La presencia de material particulado en la superficie de los paneles solares afecta significativamente el rendimiento de una instalación fotovoltaica, como se desarrolla en la sección 3.3, al reducir la potencia recopilada y ultimadamente la energía generada por los módulos.
- A partir del apartado 4.2, se dictamina favorable cambiar los intervalos de limpieza de la planta solar, de forma que sean según las pérdidas económicas relacionadas a la reducción de rendimiento de los paneles. Como punto de partida, se establecerán intervalos de 5 semanas en época seca.
- Tras todos los recursos que se orientaron para el desarrollo de esta investigación, y luego de trazar una metodología para establecer periodos de limpieza, es conveniente repetir el procedimiento en cada ciclo, tomando en cuenta las particularidades de cada periodo como la generación diaria en la época del año en análisis, el correlativo del día desde la última limpieza entre ciclos y precio de la energía vigentes.

## REFERENCIAS

- [1] Bashar, H., Al-Abedb, M., Al-Ghandoorc, A, Al-Sardeahe, A., Al-Bashirc, A., *Modeling and analysis of dust and temperature effects on photovoltaic systems' performance and optimal cleaning frequency: Jordan case study*, 2018.
- [2] Bessa, J., Mucheli, L., Almonacid, F., Fernández, E., *Monitoring photovoltaic soiling: assessment, challenges, and perspectives of current and potential strategies*, 2021.
- [3] Abu-Naser, M., *Solar Panels Cleaning Frequency for Maximum Financial Profit*, Open Journal of Energy Efficiency, 2017.
- [4] Chiteka, K., Arora, R., Sridhara, S., Enweremadu, C., *A novel approach to Solar PV cleaning frequency optimization for soiling mitigation*. Scientific African, 2020.
- [5] Li, X., Mauzerall, D., Bergin, M., *Global reduction of solar power generation efficiency due to aerosols and panel soiling*. Nature Sustainability, 2020.

**ANEXO 1:**



**PROPUESTA COMERCIAL DE LIMPIEZA DE  
PANELES EN PLANTA SOLAR DE LA CANTERA  
SAN DIEGO.**

**DISTRIBUIDORES EN EL SALVADOR DE LAS MARCAS:**  
 GREAT GLOVE, SKIN CARE, GERSON, CORDOVA, ANSELL,  
 ELVEX, ENCON, REFRIGIWEAR, MAKAALE, REMCO, WEB  
 DEVICES, ONGUARD.

San Salvador, 09 de mayo del 2024.

Señores  
**LA CANTERA**  
 Presente

Reciba un cordial saludo de nuestra empresa, deseándoles éxito en su gestión administrativa. Tengo el agrado de poner a su consideración precios en Servicios de Limpieza de Paneles Solares:

| CANTIDAD | Descripción  |  |
|----------|--|--|
| 1        | <p><b>Tu solución de limpieza de paneles solares todo en uno.</b><br/> <b>Modelo: F1 SolarCleano.</b></p> <p>Con un 20% de capacidad de limpieza más que los robots similares del mercado, SolarCleano es una solución rápida y eficiente para la limpieza de los paneles solares. El robot ha sido diseñado para que una persona pueda configurarlo y controlarlo de forma independiente.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• SolarCleano puede separarse en 4 partes. Una persona puede levantar cada pieza sola. Por lo tanto, se puede montar, transportar y desmontar fácilmente sin ayuda externa. El montaje es fácil y se hace en unos pocos pasos.</li> <li>• El robot funciona con batería y se controla desde el suelo.</li> </ul> <p>El SolarCleano F1 ha sido diseñado para satisfacer todas tus necesidades de limpieza para todo tipo de instalaciones.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• El robot más rápido del mercado: hasta 1.600 m<sup>2</sup>/h.</li> <li>• Un robot - 2 MW - 1 día - 1 persona</li> <li>• Para la limpieza de paneles solares en seco y en húmedo.</li> <li>• Cruza fácilmente cualquier hueco hasta 70 cm.</li> <li>• Pads especiales para limpiar en</li> </ul> |   |

|  |   |                        |
|--|---|------------------------|
|  | <p>ángulo de 25° con agua.</p> <p>Se conecta a mangueras de jardín estándar de 13-15 mm de diámetro y de 2,0 a 8,0 bares de presión de agua para la limpieza de paneles solares. Válvulas para regular el consumo de agua</p> <p>Sistema de limpieza de paneles solares sin agua</p> <p>Certificado de NO micro fisuras tras la prueba electroluminiscente.</p> <p>Caja de conmutación eléctrica central. Alimentación por batería con una autonomía de 2h30.</p> <p>Cámara para una operación remota segura.</p> <p>Cepillos helicoidales de 1,1m, 1,2m y 2,2m con 2 tipos de cerdas para la limpieza en seco y en húmedo.</p> <p>Orugas de alta gama. Presión en el panel 4200Pa.</p> |                        |
|  | <b>SERVICIO DE LIMPIEZA</b>   | <b>PRECIO UNITARIO</b> |
|  | ≤ 100 paneles Solares   | \$4.80                 |
|  | 101 a 500 paneles Solares   | \$2.10                 |
|  | 500 a 1,000 paneles Solares   | \$0.90                 |
|  | ≥ 1,000 paneles Solares   | \$0.55                 |

**NOTA:** Precios no incluyen IVA

Tiempo de entrega: Inmediata sujeta a previa venta

Validez de oferta: 8 días o mientras duren existencias

**NOTA IMPORTANTE: ES NECESARIO QUE EXISTA UN SALIDA DE SUMINISTRO DE AGUA Y UNA MANGUERA DE JARDIN CERCA PARA CONECTAR EL ROBOT**

Agradeciendo de antemano su atención a la presente y esperando poder servirle como usted se lo merece me suscribo de usted.

**Atentamente,**

CARMEN DE ORTEGA

CEL:7150-9106

**PROVEEDORES DE INSUMOS**

**DIVERSOS, S. A D E C. V**

Pagina Web: [www.pidelsalvador.com](http://www.pidelsalvador.com)

**ANEXO 2:**

**FICHA TÉCNICA DE PANELES SOLARES  
MONOCRISTALINOS TRINASOLAR.**



BACKSHEET MONOCRYSTALLINE MODULE

PRODUCT: TSM-DE19

PRODUCT RANGE: 530-555W

555W+

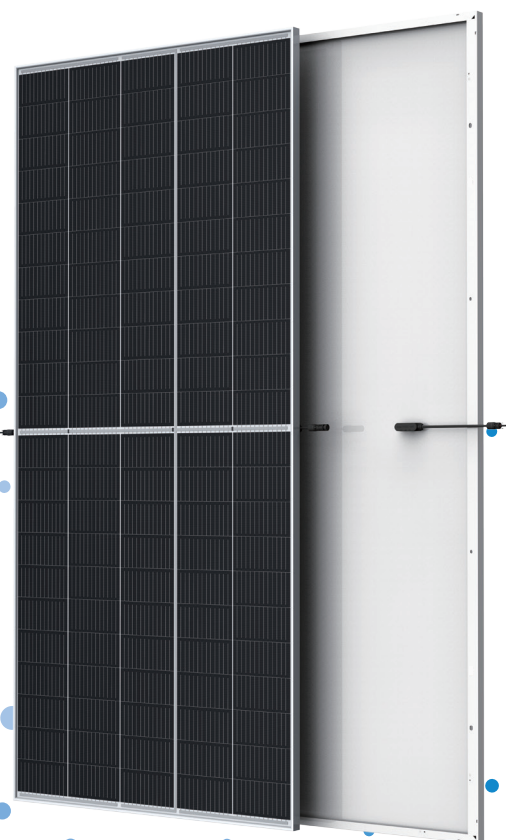
MAXIMUM POWER OUTPUT

0~+5W

POSITIVE POWER TOLERANCE

21.2%

MAXIMUM EFFICIENCY



High customer value

- Lower LCOE (Levelized Cost Of Energy), reduced BOS (Balance of System) cost, shorter payback time
- Lowest guaranteed first year and annual degradation;
- Designed for compatibility with existing mainstream system components
- Higher return on Investment



High power up to 555W

- Up to 21.2% module efficiency with high density interconnect technology
- Multi-busbar technology for better light trapping effect, lower series resistance and improved current collection



High reliability

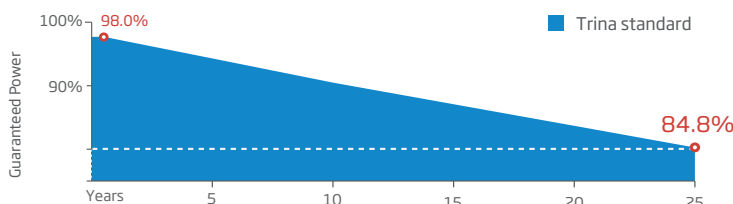
- Minimized micro-cracks with innovative non-destructive cutting technology
- Ensured PID resistance through cell process and module material control
- Mechanical performance up to 5400 Pa positive load and 2400 Pa negative load



High energy yield

- Excellent IAM (Incident Angle Modifier) and low irradiation performance, validated by 3rd party certifications
- The unique design provides optimized energy production under inter-row shading conditions
- Lower temperature coefficient (-0.34%) and operating temperature

Trina Solar's Backsheet Performance Warranty



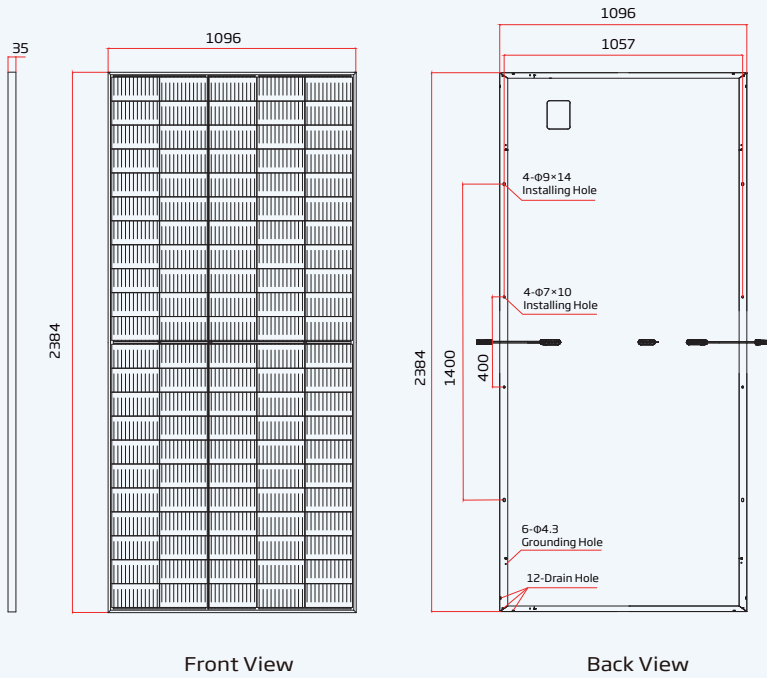
Comprehensive Products and System Certificates



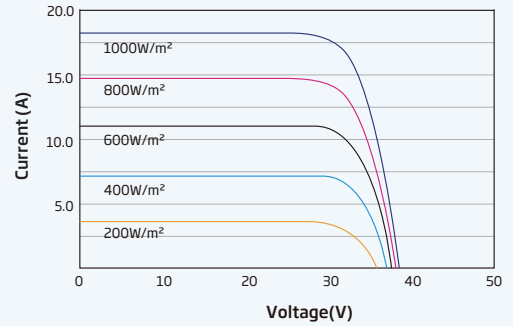
IEC61215/IEC61730/IEC61701/IEC62716/UL61730  
 ISO 9001: Quality Management System  
 ISO 14001: Environmental Management System  
 ISO14064: Greenhouse Gases Emissions Verification  
 ISO45001: Occupational Health and Safety Management System



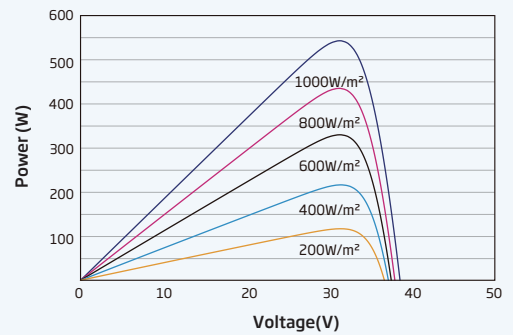
### DIMENSIONS OF PV MODULE(mm)



### I-V CURVES OF PV MODULE(545 W)



### P-V CURVES OF PV MODULE(545W)



#### ELECTRICAL DATA (STC)

| Peak Power Watts-P <sub>MAX</sub> (Wp)*    | 530    | 535   | 540   | 545   | 550   | 555   |
|--|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Power Tolerance-P <sub>MAX</sub> (W)       | 0 ~ +5 |       |       |       |       |       |
| Maximum Power Voltage-V <sub>MPP</sub> (V) | 30.8   | 31.0  | 31.2  | 31.4  | 31.6  | 31.8  |
| Maximum Power Current-I <sub>MPP</sub> (A) | 17.21  | 17.28 | 17.33 | 17.37 | 17.40 | 17.45 |
| Open Circuit Voltage-V <sub>OC</sub> (V)   | 37.1   | 37.3  | 37.5  | 37.7  | 37.9  | 38.1  |
| Short Circuit Current-I <sub>SC</sub> (A)  | 18.31  | 18.36 | 18.41 | 18.47 | 18.52 | 18.56 |
| Module Efficiency η <sub>m</sub> (%)       | 20.3   | 20.5  | 20.7  | 20.9  | 21.0  | 21.2  |

STC: Irradiance 1000W/m<sup>2</sup>, Cell Temperature 25°C, Air Mass AM1.5. \*Measuring tolerance: ±3%.

#### ELECTRICAL DATA (NOCT)

|  |       |       |       |       |       |       |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Maximum Power-P <sub>MAX</sub> (Wp)        | 401   | 405   | 409   | 413   | 417   | 420   |
| Maximum Power Voltage-V <sub>MPP</sub> (V) | 28.6  | 28.8  | 29.0  | 29.2  | 29.3  | 29.5  |
| Maximum Power Current-I <sub>MPP</sub> (A) | 14.01 | 14.06 | 14.10 | 14.15 | 14.19 | 14.23 |
| Open Circuit Voltage-V <sub>OC</sub> (V)   | 35.0  | 35.1  | 35.3  | 35.5  | 35.7  | 35.9  |
| Short Circuit Current-I <sub>SC</sub> (A)  | 14.76 | 14.80 | 14.84 | 14.88 | 14.92 | 14.96 |

NOCT: Irradiance at 800W/m<sup>2</sup>, Ambient Temperature 20°C, Wind Speed 1m/s.

#### MECHANICAL DATA

|                      |   |
|----------------------|---|
| Solar Cells          | Monocrystalline   |
| No. of cells         | 110 cells   |
| Module Dimensions    | 2384×1096×35 mm (93.86×43.15×1.38 inches)   |
| Weight               | 28.6 kg (63.1 lb)   |
| Glass                | 3.2 mm (0.13 inches), High Transmission, AR Coated Heat Strengthened Glass  |
| Encapsulant material | EVA/POE   |
| Backsheet            | White   |
| Frame                | 35mm(1.38 inches) Anodized Aluminium Alloy  |
| J-Box                | IP 68 rated   |
| Cables               | Photovoltaic Technology Cable 4.0mm <sup>2</sup> (0.006 inches <sup>2</sup> ),<br>Portrait: 280/280 mm(11.02/11.02 inches)<br>Landscape: 1400/1400 mm(55.12/55.12 inches) |
| Connector            | MC4 EV02 / TS4*   |

\*Please refer to regional datasheet for specified connector.

#### TEMPERATURE RATINGS

|   |             |
|---|-------------|
| NOCT (Nominal Operating Cell Temperature)   | 43°C (±2°C) |
| Temperature Coefficient of P <sub>MAX</sub> | -0.34%/°C   |
| Temperature Coefficient of V <sub>OC</sub>  | -0.25%/°C   |
| Temperature Coefficient of I <sub>SC</sub>  | 0.04%/°C    |

#### MAXIMUM RATINGS

|                         |                                 |
|-------------------------|---------------------------------|
| Operational Temperature | -40~+85°C                       |
| Maximum System Voltage  | 1500V DC (IEC)<br>1500V DC (UL) |
| Max Series Fuse Rating  | 30A                             |

#### WARRANTY

12 year Product Workmanship Warranty  
25 year Power Warranty  
2% first year degradation  
0.55% Annual Power Attenuation

(Please refer to product warranty for details)

#### PACKAGING CONFIGURATION

Modules per box: 31 pieces  
Modules per 40' container: 620 pieces