

Reducción de la eficiencia energética del parque solar UPAM por suciedad y deposición de polvo

FLORES-RAMÍREZ, Oscar†, HUITZIL-VELASCO, Ignacio, GONZÁLEZ-LÓPEZ, Ricardo y HERNÁNDEZ-DÍAZ, Aldo

Departamento de Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica de Amozoc

Recibido 6 de Julio, 2017; Aceptado 10 de Septiembre, 2017

Resumen

Los sistemas fotovoltaicos los podemos definir como un conjunto de elementos eléctricos, electrónicos y mecánicos que realizan la transformación de la radiación solar en energía eléctrica, los de conexión a red son los más idóneos para satisfacer demandas energéticas considerables, pero igual que todo proceso de generación de potencia eléctrica, las pérdidas son un factor determinante que hay que tener presente en todo momento para poder posteriormente evaluar el rendimiento de los sistemas. En este trabajo se realiza un análisis de la pérdida de energía eléctrica debido a suciedad y deposición de polvo en paneles solares del parque solar de la Universidad Politécnica de Amozoc; el cual consta de 200 paneles de 250 W, 5 inversores de la marca Fronius IG Plus V 10.0-1, para generar 7.2 MWh mensual. Después del análisis requerido se llegó a la conclusión que el sistema pierde el 11 % de su generación total, equivalente a 792 kWh mensual, esto ocasiona una pérdida de \$ 21,859.00 anual, para remediar esto se implementó el sistema de limpieza por pértigas y agua.

Sistema Fotovoltaico, energía eléctrica, paneles solares, radiación, rendimiento

Abstract

Photovoltaic systems can be defined as a set of electrical, electronic and mechanical elements that perform the transformation of solar radiation into electrical energy, those of connection to grid are the most suitable to meet considerable energy demands, but just as any process of generating electricity Electric power, losses are a determining factor and to keep in mind at all times to be able to subsequently evaluate the performance of systems. In this work an analysis of the loss of electrical energy due to dirt and deposition of dust in solar panels of the solar park of the Universidad Politécnica de Amozoc is carried out; which consists of 200 panels of 250 W, 5 inverters Fronius IG Plus V 10.0-1, to generate 7.2 MWh per month. After the required analysis, it was concluded that the system loses 11% of its total generation, equivalent to 792 kWh per month, which causes a loss of \$ 21,859.00 per year. To remedy this, the system of cleaning by poles and water was implemented.

Photovoltaic system, electric power, solar panels, radiation, performance

Citación: FLORES-RAMÍREZ, Oscar, HUITZIL-VELASCO, Ignacio, GONZÁLEZ-LÓPEZ, Ricardo y HERNÁNDEZ-DÍAZ, Aldo. Reducción de la eficiencia energética del parque solar UPAM por suciedad y deposición de polvo. Revista de Innovación Sistemática 2017. 1-3:26-36

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

El aprovechamiento de la energía del Sol de manera directa o indirectamente ha sido una constante en la humanidad, la necesidad de emplear nuevos métodos de generación de energía que sean de pequeño o nulo impacto ecológico ha dado como resultado el estudio de los métodos que emplean recursos renovables, uno de ellos es el aprovechamiento de la energía solar que es de elevada calidad energética y de insignificante impacto al ambiente además de ser inagotable a escala humana (Campos, 2012).

En México se han realizado diferentes trabajos relacionados con la puesta a punto de sistemas fotovoltaicos y es uno de los temas de investigación en área de energías de mayor interés. La importancia que tienen los sistemas fotovoltaicos estriba en los beneficios como son, la reducción del consumo de energía eléctrica producida por combustibles fósiles que contaminan al medio ambiente, es una fuente inagotable de energía, se reduce la dependencia del petróleo y otros combustibles fósiles, bajos costos de mantenimiento. Son sistemas silenciosos limpios que no afectan el medio ambiente, los paneles solares pueden ser añadidos gradualmente y así incrementar la energía disponible de acuerdo a la demanda. Cabe mencionar que la inversión inicial es significativa, pero su retorno es de corto a mediano plazo, ya que después de recuperar lo invertido, el resto de la energía producida representa utilidad.

Los problemas a los que se enfrenta una instalación de este tipo y de esta magnitud son muchos; basándonos en el funcionamiento y condiciones óptimas de un panel solar, uno de los problemas que mayor impacto puede llegar a tener es la limpieza de las placas solares, teniendo en cuenta el tipo de suelo y la exposición a la intemperie que tienen, la limpieza es un problema que se debe atacar de la mejor forma para no afectar la producción de energía pero que tampoco implique un gasto económico perjudicial. En este proyecto se propone la técnica de limpieza por pértigas y agua, así como el número de limpiezas al año apropiado para evitar que los paneles solares del parque solar de la Universidad Politécnica de Amozoc disminuyan su eficiencia debido a las condiciones que se presentan por el tipo de suelo y afecten la producción total del parque solar.

Estudio del arte

Existen estudios que han mostrado grandes variaciones del rendimiento de los paneles solares debido a la suciedad y deposición de polvo, por ejemplo en Kuwait se encontró una reducción del 17% en la producción de energía de módulos fotovoltaicos debido a la acumulación de arena de más de seis días. En Hermosillo, Sonora, México se encontró una reducción que oscila entre 8.5 % y 14 % debido a deposición de polvo por 20 días (Cabanillas y Munguía, 2011). En Málaga, España se obtuvo una reducción del 22% debido a deposición de polvo por 3 meses (Zorrilla et al., 2011). En Jodhpur, desierto de Thar, India se obtuvo una reducción del 12.78 % con un ciclo de limpieza de una semana (Nahar y Gupta, 1990). En Singapur se obtuvo una reducción del 12.4 % tras 33 días de ciclo de limpieza (Hee et., 2012). En Taiyuan, China se obtuvo una reducción del 15 % tras 2 semanas de ciclo de limpieza (Liquan et., 2012).

Factores de pérdidas energéticas

Al igual que en otros procesos de generación de potencia eléctrica, las pérdidas son un factor determinante que hay que tener presente en todo momento para poder posteriormente evaluar los rendimientos de los equipos. A priori resulta muy fácil pensar que la energía producida por una instalación fotovoltaica es directamente proporcional a la irradiación incidente en el plano del generador fotovoltaico, la experiencia y distintos estudios muestran que la energía producida por un módulo fotovoltaico es sensiblemente inferior. Esta disminución de la energía entregada por el generador respecto de la energía solar incidente puede ser explicada mediante una serie de pérdidas, como las pérdidas por no cumplimiento de la potencia nominal, las pérdidas de mismatch o de conexionado, las pérdidas por polvo y suciedad, las pérdidas angulares y espectrales, las pérdidas por caídas óhmicas en el cableado, las pérdidas por temperatura, las pérdidas por sombreado del generador fotovoltaico y pérdidas por rendimiento AC/DC del inversor (ybasolar.net).

Distintas tecnologías de limpieza

Sistema de limpieza con pértigas y agua

Es uno de los sistemas más utilizados. Se basa en la limpieza mecánica con pértigas especiales para vidrio, utilizando como apoyo un sistema de equipos de bombeo de agua y mangueras habitualmente integrados dentro de un vehículo para desplazarlos, que tratan el agua in situ mediante sistemas de filtros de partículas y un descalcificador, cuya finalidad es la de evitar la acumulación de cal que habitualmente porta el agua. La aplicación de agua se realiza mediante pértigas de fibra de carbono y poliéster, de densidad y grosor adecuados, utilizados para limpieza de vidrio y especialmente diseñadas para evitar las ralladuras.



Figura 1 Técnica de Pértigas y agua

Fuente: bibing.us.es/.../6-ANALISIS+DE+DISTINTAS+TECNOLOGIAS+DE+LIMPIEZA.pdf

Sistema de limpieza con agua a presión

Este sistema de limpieza se realiza mediante un vehículo dotado de una cuba de agua de no menos de 2000 litros y un grupo de motobombas. Este mismo mecanismo de limpieza podemos encontrarlo en diferentes versiones: Para instalaciones fijas se puede utilizar un operario que maneja la pistola a presión y otro que se encarga de conducir y para instalaciones con estructuras de seguimiento grandes, existen otras versiones.



Figura 2 Técnica de Agua a presión

Fuente: bibing.us.es/.../6-ANALISIS+DE+DISTINTAS+TECNOLOGIAS+DE+LIMPIEZA.pdf

Sistema de rodillo autopropulsado

El sistema consta de un vehículo autopropulsado con un rodillo de limpieza con cerdas de limpieza suaves para no dañar la superficie del módulo. El operador se sitúa en una zona con una visión óptima del sistema fotovoltaico.

La limpieza se realiza con agua descalcificada para evitar los residuos de cal que acortan la vida de los paneles.



Figura 3 Técnica de rodillo autopropulsado

Fuente: bibing.us.es/.../6-ANALISIS+DE+DISTINTAS+TECNOLOGIAS+DE+LIMPIEZA.pdf

Sistemas de limpieza mecanizados-automáticos

Estos sistemas se caracterizan por estar instalados en la propia estructura de sujeción de los módulos. Atendiendo a los criterios de este análisis, existen algunas variedades: Sistemas con rozamiento, el sistema consta de un cepillo-rodillo fabricado en nylon de longitud máxima de 10 m que va recorriendo los paneles y está fijado a la estructura.



Figura 4 Técnica mecanizados-automáticos

Fuente: bibing.us.es/.../6-ANALISIS+DE+DISTINTAS+TECNOLOGIAS+DE+LIMPIEZA.pdf

Sistema de limpieza robotizada

Se plantea la utilización de robots automatizados que realicen la limpieza de las hileras de módulos con una inclinación no mayor a 45°. Estos dispositivos serían similares a los robots limpia-piscinas. Este sistema podría enfocarse a las instalaciones sobre cubierta, las cuales son de difícil acceso.



Figura 5 Técnica robotizada

Fuente: bibing.us.es/.../6-ANALISIS+DE+DISTINTAS+TECNOLOGIAS+DE+LIMPIEZA.pdf

Sistemas fotovoltaicos

Se define como sistema fotovoltaico el conjunto de componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que concurren para captar y transformar la energía solar disponible, transformándola en utilizable como energía eléctrica. Estos sistemas, independientemente de su utilización y del tamaño de potencia, se pueden dividir en dos categorías:

- Instalaciones aisladas de la red eléctrica: En las que la dependencia no posee energía eléctrica de la red convencional y, por tanto, su consumo eléctrico ha de ser proporcionado íntegramente por la instalación solar fotovoltaica, que almacenará la generación eléctrica solar en baterías para su uso cuando sea solicitada.

- Instalaciones conectadas a la red eléctrica convencional: En las que la dependencia posee suministro eléctrico y, por tanto, la generación eléctrica de la instalación solar es destinada, íntegramente, a su venta a la red eléctrica de distribución convencional. Los sistemas conectados a la red son sencillos, sólo requieren instalar los módulos fotovoltaicos, el cableado y el inversor, no precisando del uso de baterías (Castilla, 2007).

Las centrales fotovoltaicas son los lugares donde se lleva a cabo la obtención de energía solar para convertirse en energía eléctrica de una forma industrial, el destino de esta energía no es algo que competa necesariamente las centrales fotovoltaicas (Campos, 2012).

Relación de rendimiento o PR

El coeficiente de rendimiento es una medida de la calidad de una planta fotovoltaica que es independiente de la ubicación y por lo tanto a menudo descrito como un factor de calidad. La relación de rendimiento (PR) se expresa como porcentaje y describe la relación entre las salidas de energía reales y teóricas de la instalación fotovoltaica. Por lo tanto, muestra la proporción de la energía que está realmente disponible para la exportación a la red después de la deducción de la pérdida de energía y del consumo de energía para la operación.

Curva de corriente vs tensión (curva I-V)

La representación típica de la característica de salida de un dispositivo fotovoltaico (celda, módulo, sistema) se denomina curva corriente tensión.

La corriente de salida se mantiene prácticamente constante dentro del rango de tensión de operación y, por lo tanto el dispositivo se puede considerar como una fuente de corriente constante en este rango. La corriente y la tensión a la cual opera el panel fotovoltaico están determinadas por la radiación solar incidente, por la temperatura ambiente y por las características de las cargas conectadas. Los valores trascendentes de esta curva son: Corriente de cortocircuito (ICC), Potencia Pico (Pmp), Corriente a máxima potencia (IMP), Tensión a máxima potencia (VMP) (Castilla, 2007).

Parque solar UPAM

El Parque solar UPAM genera 86.4 MW al año, con esta cantidad de generación se abastece el 60 % del consumo de la Universidad Politécnica de Amozoc, el área que ocupa el parque es de 400 m², consta de 200 paneles monocristalinos y 5 inversores Fronius IG Plus V 10.0-3, las características de los paneles y los inversores se muestran en las tablas 1 y 2. El proyecto se localiza en Amozoc de Mota, Puebla, el parque solar UPAM se muestra en la figura 6.



Figura 6 Parque solar UPAM

Fuente: Elaboración Propia

Módulo fotovoltaico marca Solartec		
Modelo	S60MC-250	
Tipo de celda	Monocristalino	
Número de celdas	60	
Condiciones de medición	SCT	NOCT
Voltaje a circuito abierto (Voc)	37.92 V	35.10 V
Voltaje óptimo de operación (Vmpp)	30.96 V	28.50 V
Corriente a corto circuito (Isc)	8.62 A	6.95 A
Corriente óptima de operación (Impp)	8.07 A	6.36 A
Potencia máxima (Pmax)	250 W	181.6 W
Eficiencia del modulo	15.37 %	
Temperatura de operación	-40 °C a +90 °C	
Dimensiones	1640mm x 992mm	
Peso	20.5 kg	
Área total de 200 paneles	323.37 m ²	
Carga máxima	2400 Pa	

Tabla 1 Características de los paneles fotovoltaicos

Fuente: *Elaboración Propia*

Inversor marca Fronius	
Modelo	Fronius IG Plus V 10.0-3
Potencia recomendada de la instalación fotovoltaica	8500 - 11500 Wp
Gama de tensión MPP	230 - 500 V DC
Máxima tensión de entrada (con 1000 W/m ² / 14 °C en marcha sin carga)	600 V DC
Tensión de entrada nominal	390 V
Corriente de entrada nominal	27.6 A
Máxima corriente de entrada	46.7 A
Potencia de salida nominal (Pnom)	9995 W
Tensión de red nominal	208 V / 240 V
Margen de tensión de servicio AC	211 - 264 V
Corriente de salida nominal	27.7 A AC
Fases	3
Margen de frecuencia de salida	59.3 - 60.5 Hz
Máximo rendimiento	96.2 %

Tabla 2 Características de los inversores Fronius

Fuente: *Elaboración Propia*

La irradiación se obtuvo con la estación meteorológica instalada en la Universidad Politécnica de Amozoc, los resultados se muestran en la tabla 3.

Mes	Irradiación (kWh/m ² /día)
Enero	4.9
Febrero	5.5
Marzo	6.2
Abril	6.4
Mayo	6.1
Junio	5.7
Julio	5.8
Agosto	5.8
Septiembre	5.2
Octubre	5
Noviembre	4.7
Diciembre	4.4
Promedio	5.5

Tabla 3 Irradiación en la UPAM

Fuente: *Elaboración Propia*

Metodología

Se realizó un seguimiento a la limpieza de los paneles solares, la cual inicio en el mes de enero de 2016 y finalizo en enero de 2017, durante ese periodo de tiempo se aplicó la técnica de limpieza de pértigas y agua, en los meses de enero, febrero, mayo, agosto, octubre, noviembre y diciembre de 2016 y enero de 2017, y se comparó el PR que se obtuvo por inversor. Se aplicó en estos meses la técnica de limpieza porque es cuando existe más polvo en la universidad.

Las especificaciones que se tomaron en consideración para realizar la limpieza son: Agua para consumo humano, con un pH no mayor a 7 y 8 solidos por unidad, con esto se hace cumplir la garantía en caso de algún fallo, además de garantizar vida útil y en óptimas condiciones del panel. La técnica de limpieza utilizada fue el de “Pértigas y agua”, para esto se utilizó una Motobomba de 6 HP, Jalador, Cepillo de cerdas finas, franela, la universidad cuenta con el equipo y material necesario para realizar la limpieza de los paneles, de tal forma que no hay que invertir ningún peso.

Para realizar la limpieza de los paneles solares se roció agua a presión con la motobomba para quitar el exceso de tierra, con el cepillo se remueve la tierra que no ha sido retirada con la presión de agua, Se vuelve a rociar agua para quitar la tierra que pudiera haber quedado en los paneles, enseguida se quita el exceso de agua con el jalador y con la franela se seca y se procura quitar el paño, como se muestra en la figura 7.



Figura 7 Limpieza de los paneles con la técnica de pértigas y agua

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 8 se muestran los paneles antes y después de aplicar la técnica de limpieza, como se puede observar en los paneles la deposición de polvo es uniforme.



Figura 8 Paneles antes y después de aplicar la técnica de limpieza

Fuente: Elaboración Propia

Resultados

En la figura 9 se observa un aumento promedio de aproximadamente el 11% por cada inversor en las mediciones antes y después de aplicar la técnica de limpieza. Para realizar este proceso se utilizó el equipo multifuncional de la marca “HT Instruments” para una completa verificación en instalaciones FV modelo “Solar I- V”.

Comparación de PR antes y después de la limpieza de los paneles

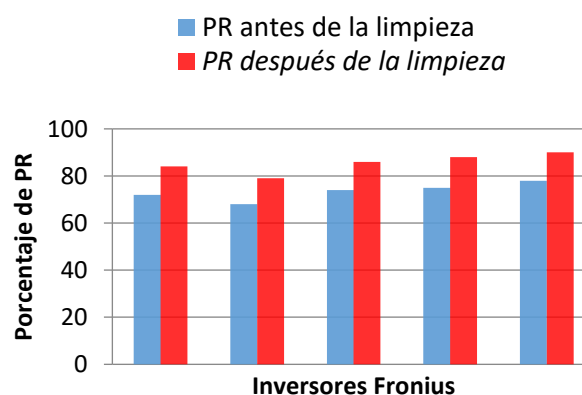


Gráfico 1 Gráfica de comparación de PR antes y después de limpieza.

Fuente: Elaboración Propia

En la la tabla 4, se observa la cantidad de agua que se requiere para la limpieza del parque solar UPAM, que consta de 200 paneles.

Cantidad de agua utilizada para limpiar el parque solar UPAM con la técnica de Pértigas y agua		
Litros de agua por panel	Litros de agua por string	Litros de agua para el parque solar
2.3	92	460

Tabla 4 Gasto de agua en la limpieza total de paneles

Fuente: Elaboración Propia

El sistema fotovoltaico se puso en marcha en noviembre de 2014 y la primera limpieza se realizó en enero de 2016, como se muestra en la figura 10, los meses en que los paneles tenían suciedad y deposición de polvo su generación del parque solar UPAM osciló entre 7 y 7.4 MWh que fueron en los meses de marzo, abril, junio, julio y septiembre de 2016. Durante los meses que se aplicó la limpieza la generación del parque aumentó aproximadamente entre 11 y 12 %.

La limpieza se aplicó cada mes y cada dos meses, los resultados muestran que la generación se mantiene casi al mismo porcentaje en esos periodos, de tal forma que se tomó la decisión de realizar la limpieza de paneles cada dos meses.

Durante los meses de octubre, noviembre, diciembre y enero se aplicó la limpieza cada mes ya que el parque solar recibe mayor polvo de los terrenos de siembra. Los resultados se muestran en la figura 10.



Figura 10 Resultados de potencia obtenidos antes y después de aplicar la limpieza de paneles

Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 11 se muestra las toneladas de bioóxido de carbono (CO₂) que se deja de emitir a la atmósfera, con esto se puede confirmar que los sistemas fotovoltaicos ayudan a la preservación del planeta.

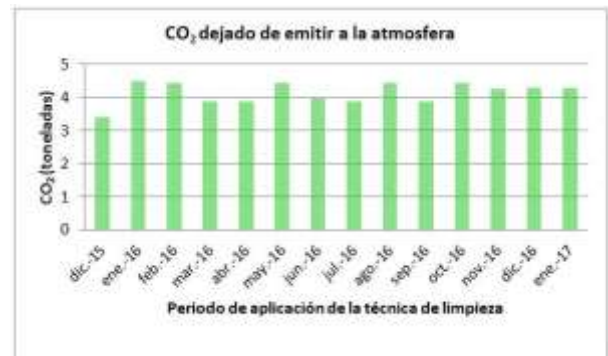


Figura 11 Bioóxido de carbono dejado de emitir a la atmosfera

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 12 se muestra la potencia generada en el mes de septiembre cuando los paneles solares estaban sucios, en la figura 13 se muestra la potencia generada después de aplicar la técnica de pértigas y agua, como se observa en dichas figuras existe un aumento del 12 % en la producción de energía eléctrica en general después de aplicar la técnica de limpieza. En ambas figuras el eje x representa los días y el eje y la potencia generada.

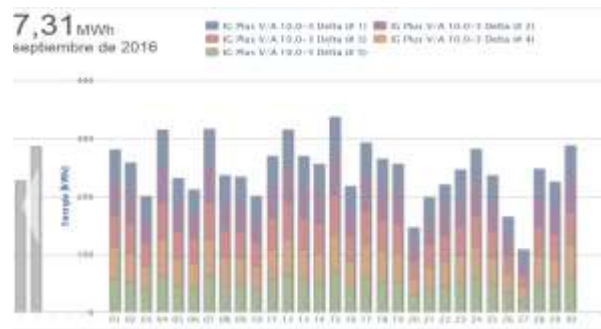


Figura 12. Generación de potencia en el mes de septiembre, cuando los paneles estaban sucios

Fuente: solarweb.com

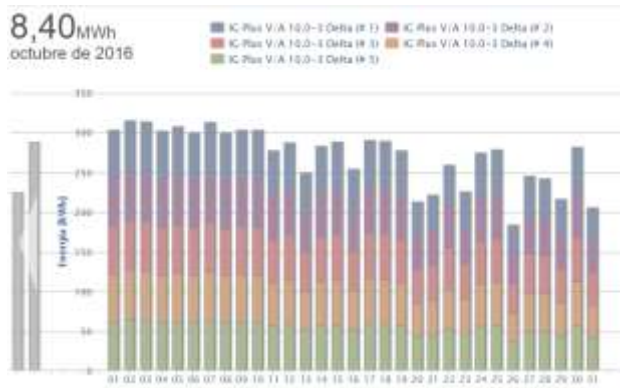


Figura 13 Generación de potencia en el mes de octubre, después de aplicar la técnica de limpieza

Fuente: solarweb.com

En la figura 14 se muestra la cantidad de CO₂ que se deja de emitir a la atmosfera en el mes de septiembre cuando los paneles estaban sucios, en la figura 15 se muestra la cantidad de CO₂ que el parque solar UPAM evita que llegue a la atmosfera después de aplicar la limpieza de los paneles, como se puede observar de las figura 12, 13, 14 y 15 se deja de emitir más CO₂ cuando se produce más potencia. Para generar 7.31 MWh se requieren 787.71 litros de gasolina y para generar 8.40 MWh se requieren 905.17 litros de gasolina, de tal forma que cuando se realiza la limpieza de paneles se dejan de quemar 117.46 litros de gasolina, ocasionando la disminución de CO₂ en favor del planeta.

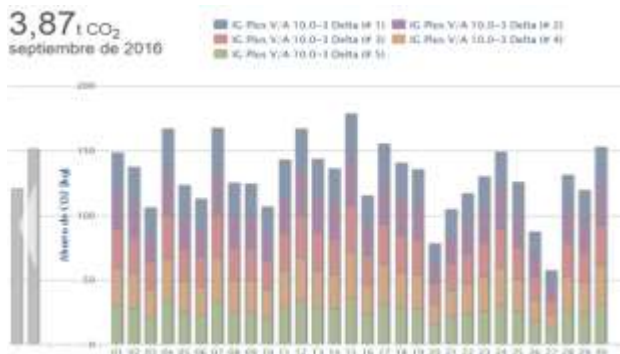


Figura 14 CO₂ dejado de emitir a la atmosfera cuando los paneles están sucios

Fuente: solarweb.com

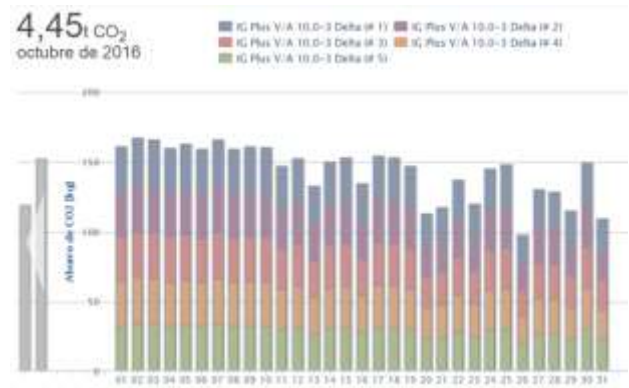


Figura 15 CO₂ dejado de emitir a la atmosfera cuando los paneles se les aplican la técnica de pértigas y agua

Fuente: solarweb.com

Agradecimiento

A la Universidad Politécnica de Amozoc por el “Apoyo a la Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico” y por gestionar los recursos ante las instancias correspondientes para el financiamiento del proyecto.

Conclusiones

En el proyecto se realizó la técnica de pértigas y agua a los paneles del parque solar UPAM para su limpieza, la cual debe ser una de las prioridades en el mantenimiento, pues la ubicación hace que el polvo sea algo casi imposible de combatir por lo que hacer limpiezas en periodos cortos garantiza un mejor rendimiento de la producción de energía.

Se llega a la conclusión que se requieren aproximadamente 460 litros de agua para realizar la limpieza del parque solar UPAM y los alumnos de la carrera de ingeniería en energía son los encargados de la limpieza con el asesoramiento de un profesor que ha tenido diplomados sobre manejo de paneles solares.

Con esta técnica evitamos perder entre 11 y 12% de potencia total del parque solar UPAM, con esta técnica de limpieza se evita la pérdida de una potencia aproximada de 0.8 MWh mensual, situación que beneficia considerablemente el aspecto económico de la universidad con un ahorro de \$ 21,859.00 anual. Con el uso de la técnica pértigas y agua y con una aplicación promedio de 5 veces al año se garantiza que el parque solar UPAM no tendrá pérdidas significativas en su producción energética anual. Con respecto a los combustibles fósiles se deja de quemar 117.46 litros de gasolina al mes cuando se realiza la limpieza de los paneles. El funcionamiento del parque ayuda a disminuir 50.35 toneladas de CO₂ al año al planeta.

Este estudio de técnicas de limpieza es específicamente para este parque solar ya que cada parque cuenta con factores particulares que afectan de manera directa a la limpieza de paneles como el tipo de clima, la frecuencia de corrientes de aire, el tipo de suelo, y la forma en cómo se distribuyen los paneles en la planta y la técnica de limpieza que se elija y solo podría usarse como referencia para algún otro parque, con los equipos idóneos y el personal necesario, esto para evitar dañar los paneles solares y tener la mayor producción energética.

El trabajo a futuro es la implementación de un manual de manejo de paneles solares donde se incluya la limpieza de los paneles, las medidas de seguridad y el uso de equipo de protección personal.

Referencias

Fletes, N., Paredes, C., Dibene, L. (2016). Eficiencia en la producción de energía de un panel fotovoltaico a diferente inclinación en Nuevo Vallarta, Nayarit. *Revista de Aplicaciones de Ingeniería*, 3.

Dibene-Arriola, L., Paredes-Vázquez, C., Messina-López, V. (2016). Efectos del polvo en el desempeño de un arreglo fotovoltaico instalado en un clima costero. *Revista de Aplicaciones de Ingeniería*, 3.

Cabanillas, R.E., Munguia, H. (2011). Dust accumulation effect on efficiency of Si photovoltaic modules. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 3.

Flores, O., González, R., Juárez, V., Huitzil, I. (2016). Análisis comparativo de rendimiento, costo y producción energética entre el sistema aislado e interconectado de la empresa cartón corrugado Puebla S.A. de C.V. *Revista de Aplicaciones de Ingeniería*, 3, 9.

Zorrilla, J., Piliouge, M., Carretero, J., Bernaola, P., Carpena, P., Mora, L., Cardona, M. (2011). Analysis of Dust Losses in Photovoltaic Modules. *Congreso Mundial de Energías Renovables*, Linkpoing, Suecia.

Nahar, N., Gupta, J. (1990). Effect of dust on transmittance of glazing materials for solar collectors under arid zone conditions of India. *Solar Wind Technol.* 7 (2), pp. 237–243.

Hee, J., Kumar, L.V., Danner, A.J., Yang, H., Bhatia, C.S. (2012). The effect of dust on transmission and self-cleaning property of solar panels. *Energy Proc.* 15, pp. 421–427.

Liqun, L., Zhiqi, L., Chunxia, S.Z.L. (2012). Degraded output characteristic at atmospheric air pollution and economy analysis of PV power system: a case study. *Przegl. Elektrotech. (Electr. Rev.)* 88 (9A), pp. 281–284.

Sayyah, M.N., Horenstein, M.K., Mazumder. (2014). Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels. *Solar Energy* 107, pp. 576–604

Universidad de Sevilla. (2015, 10 de diciembre) Estudio del efecto de la limpieza de módulos en plantas fotovoltaicas “Análisis De Distintas Tecnologías De Limpieza”. Recuperado el 10 de diciembre de 2015, de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70290/fighero/6ANALISIS+DE+DISTINTAS+TECNOLOGIAS+DE+LIMPIEZA.pdf>

Campos, F. M. (2012). “Estudio de viabilidad en planta solar fotovoltaica de 500 kW sobre la cubierta de una nave industrial en la ciudad de Sevilla” Proyecto fin de carrera, Universidad de Sevilla.

Hegazy, A. (2001). Effect of dust accumulation on solar transmittance through glass covers of plate-type collectors. *Renew. Energy* 22 (4), pp. 525–540.

Castilla, J. (2007). Introducción a la energía solar fotovoltaica. Pp: 15-16. Manual del instalador energía fotovoltaica. Gráficas Celarayn, España.

Hasan, A., Sayigh, A. (1992). The effect of sand dust accumulation on the light transmittance, reflectance, and absorbance of the PV glazing. 2º Congreso Mundial de Energías Renovables, Reading, Reino Unido, pp. 461–466.

González, R., Jiménez, H., Lagunas, J. (2003). Sistemas fotovoltaicos conectados a la red. *Boletín IIE*, octubre-diciembre del. México.

Qasem, H., Betts, T., Müllejans, H., AlBusairi, H., Gottschalg, R. (2012). Dust-induced shading on photovoltaic modules. *Progr. Photovolt: Res. Appl.* 22, pp. 218-226.

Ali Al Shehri, B. (2016). Impact of dust deposition and brush-based dry cleaning on glass. *Solar Energy, journal homepage: www.elsevier.com/locate/solener*, 8.

García, M., Marroyo, L., Lorenzo, E., Pérez, M. (2011). Soiling and other optical losses in solar-tracking PV plants in Navarra. *Progr. Photovolt: Res. Appl.* 19 (2), pp. 211–217.

Lorenzo, E., Moretón, R., Luque, I. (2013). Dust effects on PV array performance: in-field observations with non-uniform patterns. *Progr. Photovolt: Res. Appl.* 22, pp. 666–670.

Mani, M., Pillai, R. (2010). Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, pp. 3124-3131.