

ESTUDIO PRELIMINAR DEL IMPACTO ÓPTICO DEL SOILING EN TESTIGOS DE VIDRIO, EN UN ÁREA SEMIURBANA DE MADRID, PARA APLICACIÓN EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Sanz Saiz C.*, Polo Martínez J.*; Martín-Chivelet N.*

* Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), Avda. Complutense 40, 28040 Madrid, España, carlos.sanz@ciemat.es

<https://doi.org/10.34637/cies2020.1.2059>

RESUMEN

El ensuciamiento (*soiling*) de los paneles solares disminuye la producción energética de las instalaciones fotovoltaicas. Dentro del proyecto PVCastSOIL, que investiga el *soiling* desde varias perspectivas, este trabajo presenta los resultados preliminares del estudio del impacto óptico del *soiling* en un sistema fotovoltaico experimental, no conectado a red, situado en la periferia de Madrid (España). Con el objeto de estimar cuánta luz solar incidente no alcanza las células solares de los módulos fotovoltaicos debido al *soiling*, se instaló un mini-soporte que ha permitido exponer, con una inclinación de 35°, una serie de testigos de vidrio durante casi once meses. Midiendo sus espectros de transmitancia, se ha determinado que durante ese periodo el grado de *soiling* fue bajo (1-3% de pérdida de transmitancia). Por último, se comentan las mejoras aplicadas para continuar este estudio durante 2020, destacándose que el nuevo banco de pruebas de *soiling* permitirá exponer testigos de vidrio de mayor tamaño y comparar el grado de ensuciamiento para dos inclinaciones diferentes (8° y 35°).

PALABRAS CLAVE: Energía Solar Fotovoltaica, Ensuciamiento, Pérdidas ópticas

ABSTRACT

Soiling on solar panels hinders the energy production of photovoltaic facilities. Within the PVCastSOIL project, which researches soiling from several perspectives, this work presents the early results of the study of the optical impairment due to soiling on an off-grid experimental photovoltaic system located in the urban fringe of Madrid (Spain). In order to estimate how much incoming sunlight does not reach the solar cells of the photovoltaic modules due to soiling, a 35°-tilted mini-mount was installed for the outdoor exposure of a series of glass coupons during almost eleven months. From their transmission spectra measurements, it was concluded that during such period the degree of soiling was low (1-3% of transmission loss). Finally, some improvements adopted for the continuation of this study during 2020 are commented, highlighting among them a new soiling test bench which will allow using larger glass coupons as well as comparing the degree of soiling for two different tilt angles (i.e. 8° and 35°).

KEYWORDS: Photovoltaic Solar Energy, Soiling, Optical loss

INTRODUCCIÓN

Entre los diversos factores que disminuyen la producción energética de una instalación fotovoltaica (FV) se encuentra la pérdida por ensuciamiento (*soiling loss*). El ensuciamiento (*soiling*) de la cubierta frontal transparente de los módulos fotovoltaicos, cuyo estándar industrial es la lámina de vidrio solar, tiene lugar debido al depósito de diversos agentes presentes en el ambiente. Dependiendo de la localización del sistema FV, los principales causantes del *soiling* podrían ser diversos aerosoles atmosféricos (polvo de origen mineral, aerosol marino, contaminación industrial y urbana...), materia vegetal (hojas, polen...), excrementos de aves, etc. La consecuencia principal del fenómeno de *soiling* es la reducción de la irradiancia efectiva, es decir, la disminución de la luz solar incidente que, siendo transmitida eficazmente hasta las células solares, permite la generación de electricidad. Si bien todo sistema FV experimenta, en mayor o menor medida, una cierta pérdida energética debido al ensuciamiento de los módulos solares, tanto la magnitud como la estacionalidad de dicha pérdida energética varían ampliamente. Principalmente, estas diferencias aparecen en función de la ubicación geográfica, ya que la progresión del *soiling* se debe a mecanismos físico-químicos estrechamente vinculados a las condiciones climatológicas y meteorológicas (lluvia, viento, humedad relativa, temperatura, etc.). En cualquier caso, la lluvia está considerada como el más eficaz agente natural de limpieza de los paneles solares (Sayyah et al. 2014). De hecho, la pérdida por ensuciamiento típicamente se agrava durante la estación seca, es decir, en los períodos de escasez o de ausencia de precipitaciones (Piliouguine et al. 2008). Por otra parte, la pérdida por ensuciamiento también está influenciada por diversas características técnicas de la instalación FV (p.ej. las características superficiales de la cubierta del módulo, la posición de los módulos, la altura de instalación, la tecnología FV empleada, etc.).

En este contexto, la realización de ensayos *in situ* de *soiling* permite: 1) comprobar a escala local cómo evoluciona el grado de ensuciamiento a lo largo del año, adaptando consecuentemente el calendario de las operaciones de limpieza, en caso de que sea necesario; 2) estimar a escala local la magnitud de las pérdidas por ensuciamiento, es decir, tanto la anual como las estacionales, y 3) mejorar los cálculos de las herramientas de predicción de producción fotovoltaica. En resumen, permite optimizar la producción energética y los costes de limpieza, así como mejorar la misma predicción de la producción energética.

Procedimiento Experimental

Debido a nuestra participación en el Proyecto PVCastSOIL, en el CIEMAT (Madrid, España) se ha instalado un sistema fotovoltaico experimental con el objeto de evaluar el impacto local del *soiling*. Dicho sistema FV, que está situado en una azotea y consta de módulos solares que abarcan dos tecnologías FV (silicio multicristalino y telururo de cadmio) y dos ángulos de inclinación (8° y 35°), dispone de un sistema de monitorización continua que permite estimar el *soiling ratio* (SR) de los módulos solares a partir de los dos parámetros eléctricos de operación aplicables, a saber, la corriente de corto-circuito (I_{sc}) y la potencia máxima generada (P_{max}). La campaña de recogida de estos datos, que fue iniciada en 2018 y ya ha proporcionado sus primeros resultados (Martín-Chivelet et al. 2019), se prolongará hasta finales de 2020 para obtener datos estadísticamente más relevantes.

Complementariamente a las medidas eléctricas, durante diez meses y medio (del 19 de marzo de 2019 al 28 de enero de 2020) se ha realizado un estudio preliminar del impacto local del *soiling* desde el punto de vista óptico (en vez de eléctrico), cuyos resultados son el objeto del presente trabajo. En dicho estudio, para estimar la pérdida de luz transmitida que ocurre en los paneles solares a causa del ensuciamiento de sus cubiertas transparentes, se ha optado por utilizar un conjunto de muestras de vidrio a modo de *testigos*, exponiéndolas en la misma ubicación y en las mismas condiciones que los módulos FV mencionados. Para ello se montó un pequeño soporte (aprox. 40 cm x 30 cm) que permitió exponer, con un ángulo de inclinación de 35°, hasta 12 muestras de vidrio de pequeñas dimensiones (espesor 3 mm, ancho 8 cm, alto 8 cm). Durante el periodo indicado, con una periodicidad aproximadamente semanal, se procedió a recoger un par de muestras cada vez, a caracterizarlas ópticamente y a volver a colocarlas en el soporte. No obstante, cada cierto tiempo se descartó el par de muestras de vidrio en uso, continuando las medidas con otro par de muestras; de este modo, limitando el empleo reiterado de las mismas muestras, se pretendió reducir el riesgo de alterar la capa de suciedad (*soiling*) por la manipulación de las muestras y/o por la interrupción de su período de exposición ambiental durante su medida.

Para la caracterización óptica de las muestras de vidrio se ha utilizado un espectrofotómetro Perkin Elmer Lambda 900 UV/vis/NIR dotado de una esfera integradora de 150 mm de diámetro. Con dicho equipo se midieron los espectros de transmitancia hemisférica de las muestras de vidrio tanto inicialmente (“limpias”) como, periódicamente, durante su período de exposición al aire libre (“sucias”), en el intervalo de longitudes de onda de 300 a 1200 nm (Fig. 1). Tras cada recogida de una muestra de vidrio expuesta “sucia”, se procedió a medir su espectro de transmitancia, a normalizarlo respecto a su espectro de transmitancia “limpia” y, finalmente, a promediar el valor de su transmitancia normalizada en el intervalo de longitudes de onda indicado. Como la capa de suciedad depositada en las muestras podría no ser enteramente homogénea, en cada ocasión se midió la transmitancia de cada muestra en dos puntos diferentes.

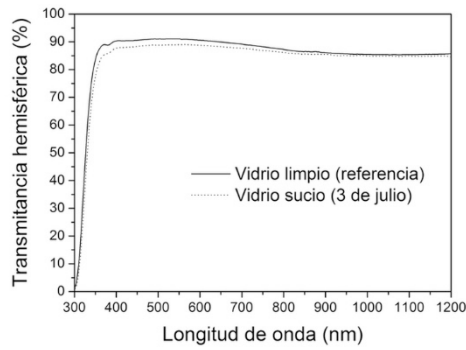


Fig. 1. Variación de la transmitancia hemisférica (sin normalizar) de un sustrato de vidrio debido a *soiling*.

Por otra parte, dado el relevante impacto de los episodios de lluvia en los fenómenos de *soiling*, mientras duró el experimento se recogieron los datos de precipitación diaria de una estación meteorológica situada en las inmediaciones. Al representar gráficamente dicha información en forma de precipitaciones mensuales, se puede comprobar que durante 2019 la lluvia fue especialmente escasa desde mayo hasta julio (Fig. 2).

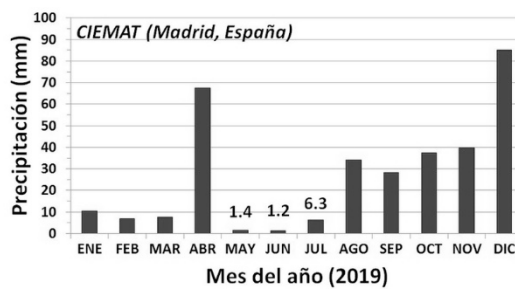


Fig. 2. Precipitaciones mensuales locales (Ciemat, 2019).

Resultados Preliminares (Primera Campaña Experimental)

Por otra parte, durante los tres primeros meses del estudio se intentó hallar una relación empírica entre el grado de ensuciamiento (*soiling*) de las muestras de vidrio y su correspondiente pérdida de transmitancia. Para ello, además de realizar las correspondientes medidas ópticas, se utilizó una microbalanza de precisión nominal 0.1 mg para determinar el incremento de peso debido a la acumulación de suciedad (es decir, la diferencia de peso de las muestras de vidrio estando “sucias” respecto a estando “limpias”). Debido a la excesiva dispersión de los datos no fue posible obtener un buen ajuste lineal, si bien se observa una mayor pérdida de transmitancia a medida que aumenta la cantidad de polvo acumulado (Fig. 3). Principalmente, la dispersión de los datos fue atribuida al bajo nivel de ensuciamiento experimentado por las muestras, que dio lugar a bajas pérdidas de transmitancia y a mínimos incrementos de masa, presentando valores en el mismo orden de magnitud que las incertidumbres de las medidas experimentales.

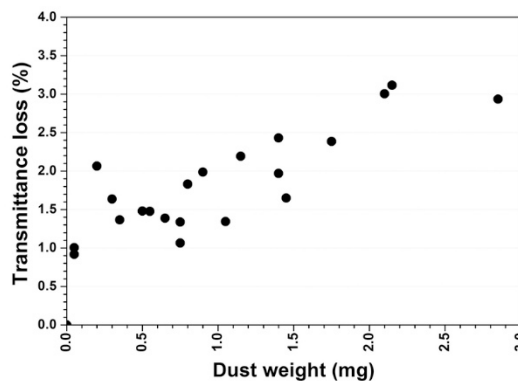


Fig. 3. Relación entre la pérdida de transmitancia y la cantidad acumulada de suciedad en testigos de vidrio expuestos con una inclinación de 35 grados.

En cualquier caso, la caracterización óptica de las muestras de vidrio se prolongó durante los diez meses y medio del estudio. Esto ha permitido, en primer lugar, obtener la evolución temporal de la transmitancia de dichas muestras (Fig. 4). En la gráfica, la línea continua representa cómo varía el valor promediado (a partir de cuatro datos: dos medidas en dos muestras) de la transmitancia hemisférica promediada. Como puede observarse, la conclusión fundamental es que la pérdida de transmitancia alcanzó valores máximos en marzo (2%) y sobre todo de mayo a julio (2–3%); durante el resto del tiempo, y presumiblemente gracias a las lluvias, más cuantiosas y frecuentes, el grado de ensuciamiento de las muestras disminuyó, reduciéndose las pérdidas de transmitancia al 1%, que es el límite superior de transmitancia observado en los testigos (véase, en la gráfica, la línea horizontal discontinua). Ha de recordarse que la inclinación favorece la limpieza por causas naturales: lluvia, viento... (Appels et al. 2013), y que esto es lo que habría de esperarse, ya que se trata de muestras de vidrio con un ángulo de inclinación de 35 grados, alejado de la horizontalidad.

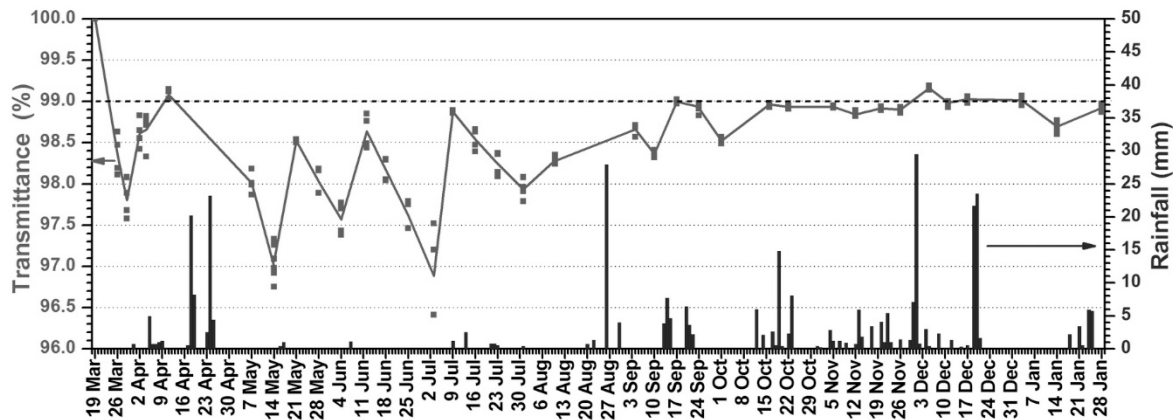


Fig. 4. Evolución temporal de la transmitancia de los sustratos de vidrio y niveles diarios de precipitación.

Se espera que la prolongación de este estudio durante 2020 proporcione mayor información sobre la evolución del *soiling* durante la “estación seca” (que en 2019 abarcó, aproximadamente, del 30 de abril al 27 de agosto). Según la Fig. 4, los datos recogidos durante este periodo no muestran una disminución progresiva de la transmitancia, sino más bien una serie de oscilaciones. Por una parte, cabría especular que en esta época hubiera mayores cargas de aerosoles atmosféricos que causarían (entre episodios de precipitaciones débiles) mayores pérdidas de transmitancia, es decir, dando lugar a la observación de los máximos niveles de ensuciamiento. Por otra parte, habría que determinar si los episodios de lluvia de esa temporada, escasos y débiles, serían causa suficiente de las recuperaciones parciales de la transmitancia observadas, o si también influyó la acción del viento como agente natural de limpieza. Cabe recordar que los episodios de lluvia débil podrían tener un impacto tanto positivo como negativo en el estado de limpieza (Naeem et al. 2015). En cualquier caso, no ha de olvidarse que estas fluctuaciones máximas observadas en la transmitancia no son grandes, sino de escasa magnitud (variaciones del 1-2%). Por último, a la vista de los resultados se concluye que disponer de medidas realizadas con mayor frecuencia durante este período facilitaría la labor de discriminar entre el impacto puntual de esos episodios de precipitaciones débiles y a la evolución del proceso de *soiling* en los días posteriores a ellos.

Resultados esperados tras la segunda campaña experimental

Además de proporcionar una estimación inicial del grado de *soiling* en la ubicación estudiada, el presente experimento ha permitido considerar una serie de mejoras para la realización de una segunda campaña experimental con testigos de vidrio durante 2020. Dichas mejoras llevaron al diseño e instalación de un banco de pruebas de *soiling* de grandes dimensiones, consistente en dos plataformas contiguas, cada una con capacidad para exponer simultáneamente 24 testigos de vidrio a un ángulo de inclinación diferente (Fig. 5), así como a la introducción de varios cambios en la metodología de muestreo. A continuación se resumen los cambios introducidos:

1. Se ha ampliado el experimento a dos ángulos de inclinación: 8°, representativo para muchos sistemas fotovoltaicos integrados en edificios (BIPV), y 35°, que se aproxima al óptimo local para la producción fotovoltaica en términos anuales. Obviamente, al añadir los testigos de vidrio en posición cuasi-horizontal (8°) se espera observar niveles de ensuciamiento (*soiling*) más significativos que los observados hasta la fecha.
2. Se ha modificado la superficie de la estructura de soporte, añadiéndose una “franja libre” en todo su perímetro. El objetivo es que la acción del viento sea, desde el punto de vista aerodinámico, equiparable para todos los testigos de vidrio expuestos (anteriormente, en el mini-soporte, estos ocupaban posiciones “no equivalentes”:

centrales, laterales y esquinas) y también que sea más representativo del *soiling* experimentado por los paneles FV, cuyas cubiertas tienen una superficie mucho mayor (Fig. 6).

3. Se ha incrementado el tamaño de los testigos de vidrio (15 cm x 10 cm, en vez de 8 cm x 8 cm). Su mayor superficie imitará mejor el efecto de los agentes meteorológicos (lluvia, viento, gravedad, etc.) en los procesos tanto de acumulación como de eliminación de suciedad sobre la superficie de los módulos FV (Fig. 6). Además, permitirá comprobar si se produce un gradiente vertical de *soiling* que resulte significativo y, en caso de precipitaciones, si la escorrentía del agua de lluvia produce un lavado y/o un arrastre de suciedad.
4. Se ha incrementado el número de testigos de vidrio expuestos a cada inclinación, de modo que ahora se utilizarán “muestras de un solo uso” (exceptuando las “muestras de control”). Los testigos retirados para ser medidos no serán devueltos a su lugar, sino que serán reemplazados inmediatamente por otros testigos limpios. Así se evitará alterar accidentalmente la capa de *soiling* debido a sucesivas manipulaciones y/o interrupciones en su exposición ambiental.
5. Paralelamente, la exposición a largo plazo de varias “muestras de control” permitirá discriminar las pérdidas ópticas temporales (causadas por *soiling* reversible mediante limpieza) de posibles pérdidas ópticas permanentes (ya sea por *soiling* irreversible o por degradación del vidrio, *weathering*). La exposición a la intemperie de estas muestras será permanente, exceptuando únicamente las necesarias medidas ópticas puntuales.
6. Se ha incrementado la frecuencia de recogida y medida de muestras (en general, dos veces por semana, en vez de semanalmente) para facilitar la interpretación de los datos experimentales respecto al estudio preliminar presentado en este trabajo. En particular, con esta mayor cantidad de datos y con un menor intervalo temporal entre ellos, se intentará correlacionar el grado de ensuciamiento en función del periodo transcurrido desde el último episodio de lluvia, considerando como tal diferentes umbrales de precipitación.



Fig 5. Vista general de la instalación FV experimental y del nuevo banco de pruebas de *soiling*.

7. En cuanto al registro de precipitaciones, en adelante se dispondrá de valores de precipitación horaria (es decir, de lluvia acumulada cada hora) en vez de precipitación diaria (anteriormente, lluvia acumulada de 0 a 24 horas). Así, considerando que los testigos de vidrio siempre se recogen a la misma hora (aprox. a las 10 horas), se podrá ajustar consecuentemente el intervalo horario de los datos de precipitación diaria (es decir: desde ahora se manejarán datos de lluvia diaria acumulada desde las 10 de la mañana del día anterior). Esto proporcionará mejores datos de lluvia en aquellos casos puntuales en los que coincidan un día de recogida de muestras y un episodio de “precipitaciones tempranas” (a saber, entre las 0 y las 10 horas).

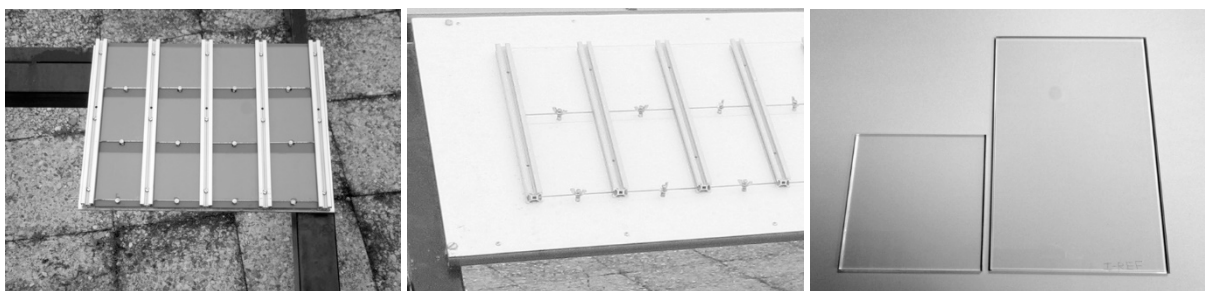


Fig. 6. De izquierda a derecha: mini-soporte para testigos de vidrio (2019), detalle del nuevo banco de pruebas (2020) y comparación de los testigos de vidrio (2019 y 2020).

CONCLUSIONES

En relación a la instalación fotovoltaica experimental con sistema de monitorización continua del CIEMAT (Madrid, España), diseñada para el estudio del impacto local del ensuciamiento (*soiling*), una primera campaña de exposición ambiental de testigos de vidrio, realizada en 2019 durante diez meses y medio en la misma ubicación, ha permitido establecer que las pérdidas ópticas por ensuciamiento (expresadas como transmitancia hemisférica normalizada) fueron del 2-3% durante la estación seca y solamente del 1% durante la estación lluviosa. En base a estos datos experimentales se ha concluido que, a grandes rasgos, dicha instalación fotovoltaica está expuesta a un nivel de *soiling* bajo. A pesar de encontrarse en una región de clima mediterráneo (concretamente de tipo Csa, según la clasificación de Köppen-Geiger), que se caracteriza por tener una estación seca prolongada, y de que efectivamente el nivel de *soiling* fue ligeramente superior durante dicha temporada, cabría haber esperado un impacto negativo del *soiling* más elevado. A grandes rasgos, este bajo impacto local del *soiling* podría atribuirse al entorno en cuestión (una área semiurbana, periférica, con menor carga de contaminación atmosférica que el centro urbano), a la instalación en altura del sistema FV (en una azotea de 10 m de altura, en vez de a nivel del suelo, implicando una menor afectación por el tráfico, por el polvo suspendido, etc.) y a la inclinación de las muestras (35 grados, lo que favorece su limpieza natural por la lluvia). Por otra parte, se han descrito una serie de mejoras introducidas en el diseño de un banco de pruebas de *soiling* y en la toma de muestras con vistas a una segunda campaña experimental de estimación del *soiling* empleando testigos de vidrio que se desarrollará a lo largo de 2020.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo económico del Proyecto PVCastSOIL (ENE2017-83790-C3-1/2/3), cofinanciado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España y el Fondo para el Desarrollo Regional Europeo.

REFERENCIAS

- Appels R., Lefevre B., Herteleer B., Goverde H., et al. (2013) Effect of soiling on photovoltaic modules. *Solar Energy* 96, 283-291
- Martín-Chivelet N., Polo J., Alonso M., Sanz C., et al. (2019) Characterization and modeling of the soiling effect on the PV generation under urban conditions. *Proceedings of 36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 9-13 September, Marseille, France.
- Naeem M.H., Tamizhmani G., Tamizhmani M.G. (2015) Climatological relevance to the soiling loss of photovoltaic modules. *2015 Saudi Arabia Smart Grid (SASG)*, Jeddah, Saudi Arabia.
- Piliouline M., Carretero J., Sidrach-de-Cardona M., Montiel D., et al. (2008) Comparative analysis of the dust losses in photovoltaic modules with different cover glasses. *Proceedings of 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 1-5 September, Valencia, Spain.
- Sayyah A., Horenstein M.N., Mazumder M.K. (2014) Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels. *Solar Energy* 107, 576-604.