

# RETRATOS DE LA CONEXIÓN FOTOVOLTAICA A LA RED (XI)

## “Visiones del gato”

Eduardo Lorenzo  
Instituto de Energía Solar  
Universidad Politécnica de Madrid

“El gato es una gárgola que se pasea por casa”  
“El gato se hace el muerto para que lo dejen dormir la siesta”  
Ramón Gómez de la Serna (“Greguerías”)

### Introducción

“Pero, ¿tú has visto alguna vez al gato?”, me espetó de golpe un lector, algo irritado porque mis artículos anteriores sobre este felino doméstico<sup>1,2</sup> le habían producido una sensación de ansiedad. Según me explicó, algunas noches llegaba a soñar que invertía sus ahorros en el negocio fotovoltaico y que un fantasma en forma de gato se merendaba con deleite sus ganancias.

Como sé que ni los fantasmas existen (¿por qué hablaremos tanto de ellos?) ni las ganancias son materia comestible, me vino el pronto de intentar tranquilizar al iracundo lector con alguna cita poética explicativa de la diferencia entre los sueños y la realidad. Pero las que se me vinieron a la cabeza (“*Que toda la vida es sueño, y los sueños, sueños son*”, –Calderón de la Barca–; “*Anoche cuando dormía /soñé, ¡bendita ilusión! / que un ardiente sol lucía / dentro de mi corazón*”, –Antonio Machado–) más bien hubieran servido para aumentar su irritación; así que decidí dejar los asuntos literarios para otra ocasión, ponerme la gorra de ingeniero, que al fin y al cabo es lo que soy, y responder al lector con hechos constatados; con la doble intención de que entendiese, primero, que el gato no resulta de encarnaciones fantasmales, sino de cosas bien concretas y, segundo, que resulta bastante fácil localizarlo y ponerle el cascabel, cuando se evita, eso sí, la extendida manía de vender la piel del oso antes de cazarlo; que es manía asentada en la pretensión de que el oso está a la vuelta de la esquina esperando a ser cazado, y en el convencimiento de que si otros no lo han cazado antes se debe, principalmente, al componente de estupidez extrema que el vendedor de la piel atribuye a todos esos otros.

Sin embargo, para esta manía hay remedios. Por ejemplo, el recuerdo de que ya van pasados más de 50 años desde que las células fotovoltaicas rinden buena utilidad en aplicaciones prácticas. La verdad es que hay poco nuevo bajo el sol, por más que la prosa de las revistas técnicas esté profusamente floreada de vocablos que prometen lo contrario: “novedoso”, “innovador”, “revolucionario”, “solución definitiva”, etc. El vendedor de la piel del oso podría, con este recuerdo, caer en la cuenta de que, aunque no fuese más que por estadística, algunos de los cazadores que le han precedido deberían

---

<sup>1</sup> E. Lorenzo, *La energía que producen los sistemas fotovoltaicos conectados a la red: El mito del 1300 y el cascabel del gato*, ERA SOLAR, nº 107, págs. 21-28, marzo-abril 2002.

<sup>2</sup> E. Lorenzo, *Retratos de la conexión fotovoltaica a la red (X): ¿Qué fue del cascabel del gato?*, ERA SOLAR, nº 142, enero-febrero 2008.

haber sido no más gilipollas que él. Pero lo más normal es que el vendedor de la piel rehúse aplicarse este remedio.

Carlo M. Cipolla escribió un memorable tratado sobre “las leyes fundamentales de la estupidez humana”<sup>3</sup>. Llegó a la conclusión de que las tales leyes son cinco, siendo una de ellas que “*la probabilidad de que una persona determinada sea estúpida es independiente de cualquier otra característica de la misma persona*”, que también puede enunciarse diciendo que “el porcentaje de estúpidos en cualquier colectivo humano es una constante universal”. Yo me declaro tan ferviente creyente en esta ley, que no tengo reparos en extenderla a muchos otros componentes del carácter humano, incluida la gilipollez. También creo que es cosa de los genes, los cuales, quizá por haberse forjado cuando la caza del oso era un asunto nada metafórico, manifiestan algunas dificultades para adaptarse a la realidad actual. Si no ando errado en esto, resulta que todos somos propensos a sufrir un cierto porcentaje de gilipollez y que, en lógica consecuencia, debemos caminar por la vida avisados de ello. Pero los hay que piensan que no es así, y que el porcentaje de gilipollez no les afecta a ellos. ¡Y éstos son, precisamente, los más gilipollas de todos! Por eso mismo, estimado lector, siempre conviene preguntarse con la mayor seriedad por cuánto de gilipollas es, o está, uno mismo, y preocuparse seriamente si la respuesta es que nada.

Todo esto no se lo dije al iracundo lector. La expresión de su cara anunciaba que no estaba el horno para bollos, y que de lo único que quería saber era de gatos tangibles y maullantes. Así que, sin más dilación, pasé a relatarle alguna visión propia de la realidad del gato.

## **De paseo por los tejados**

No hay más que echar un ojo a las fotos de cualquier número de esta revista para percatarse de que los generadores fotovoltaicos instalados sobre naves industriales tienen un papel relevante en el panorama actual; lo que está en consonancia con las ventajas apreciables que ofrecen estas ubicaciones y los clientes asociados a ellas: superficies grandes y libres de sombras, facilidad de anclaje, capacidad de evacuación de la red eléctrica, personal con buena formación eléctrica, familiaridad con los procedimientos administrativos, apetencias de diversificación empresarial, etc. Las fotos acostumbran a acompañarse de anuncios sobre su producción anual estimada, que usualmente rondan los 1500 kWh/kW.

Una posible forma de entender el mundo es clasificar a sus gentes entre quienes dicen lo que van a hacer y quienes dicen lo que han hecho. Los primeros son mayoría, y las presentaciones en prensa de las realidades fotovoltaicas no son una excepción: muchísimos anuncian estimaciones, poquísimos cuentan ventas o producciones reales. De hacerlo, se vería que la realidad de muchas instalaciones fotovoltaicas sobre naves industriales es significativamente inferior a aquella cifra. En particular, cuando los generadores se disponen prácticamente pegados a la cubierta, como muestra el ejemplo de la figura 1. Esta disposición es muy sencilla, no añade problemas mecánicos a la estructura del edificio y, por ende, resulta razonablemente estética. De ahí que sea tan frecuente. Pero –¡no hay nada gratis en la vida!– ocurre que el ángulo de inclinación de las cubiertas de las naves industriales suele ser pequeño (típicamente, inferior a 20°), por lo que esta disposición

---

<sup>3</sup> Carlo M. Cipolla, *Allegro ma non troppo*, Ed. Crítica, Barcelona (1991).

resulta ser muy propensa a acumular polvo. El generador de la figura 1 tiene una inclinación de sólo 6°.



(a)



(b)

*Figura 1. Generador fotovoltaico “pegado” a la cubierta de una nave industrial: (a) Vista del conjunto en la que se puede apreciar la disponibilidad de espacio. (b) Detalle de la sujeción.*



*Figura 2. Acumulaciones de polvo sobre el generador de la figura anterior. Resultan particularmente evidentes en la parte inferior de los módulos.*

Este asunto del polvo es problemático en la mayoría de España, porque llueve poco y la humedad relativa es baja. La fotografía 2 muestra un detalle del generador de la figura 1, tal como lo encontramos sólo unos pocos días después de haber llovido. El polvo va en detrimento de la potencia efectiva de los generadores fotovoltaicos porque oscurece y también porque introduce dispersión (en la fotografía 2 se aprecia que el polvo no se distribuye igual por todas partes). Lo primero reduce la corriente de cortocircuito y lo segundo el factor de forma. La figura 3-a muestra la curva  $I = I(V)$  del generador que nos ocupa y la figura 3-b, la de otro en todo similar (mismo lote de módulos, mismo proyecto, mismo lugar, mismo cableado, mismo día de medida, etc.) salvo en su dispo-

sición, que en este caso es sobre suelo e inclinada a 30°. En condiciones ideales, las curvas corregidas a las Condiciones Estándar de Medida<sup>4</sup> (CEM) deberían ser idénticas. Sin embargo, en la realidad no lo son. Los valores de los parámetros característicos que acompañan a las curvas muestran que el polvo ha reducido la potencia del generador de la cubierta en un 9,8 % respecto a la del generador del suelo. De esta reducción, un 7,8 % se debe al oscurecimiento, un 1 % a la dispersión y un 1 % al hecho de que las células solares en la disposición pegada al suelo trabajan algo más calientes que en la inclinada a 30°, debido a la mayor dificultad de circulación del aire por la parte posterior de los módulos<sup>5</sup>.

	(a)		(b)	
$I_{SC}$ (A)	214	-1	197	-8,8
$V_{OC}$ (V)	764	+1,2	753	-0,2
$I_M$ (A)	190	-4	175	-11,4
$V_M$ (V)	604	+0,4	588	-2,2
$P_M$ (W)	114 849	-3,5	103 210	-13,3
$FF$	0,703	-3,7	0,696	-4,7

Figura 3. Curvas  $I = I(V)$  medidas y extrapoladas a CEM de generadores fotovoltaicos. Los resultados de la tabla adjunta corresponden a dos generadores de las mismas características pero instalados: (a) sobre suelo e inclinado a 30°; (b) sobre cubierta de nave industrial con 6° de inclinación.  $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$ ,  $I_M$ ,  $V_M$ ,  $P_M$  y  $FF$  son, respectivamente, la corriente de cortocircuito, la tensión de circuito abierto, la corriente en el punto de máxima potencia, la tensión en el punto de máxima potencia, la potencia máxima y el factor de forma. Las cifras en cursiva indican el porcentaje de desviación respecto al valor nominal.

Inclinación Suciedad	30° 3 %	6° 3 %	(6/3)/(30/3)	6° 8 %	(6/8)/(30/3)
Enero	2815	1717	0,61	1503	0,53
Febrero	3199	2320	0,73	2074	0,65
Marzo	4631	3823	0,83	3512	0,76
Abril	4273	4052	0,95	3748	0,88
Mayo	4810	5005	1,04	4636	0,96
Junio	4906	5316	1,08	4956	1,01
Julio	4914	5245	1,07	4870	0,99
Agosto	4817	4743	0,98	4410	0,92
Septiembre	4387	3848	0,88	3529	0,80
Octubre	3644	2744	0,75	2495	0,68
Noviembre	2700	1734	0,64	1525	0,56
Diciembre	2206	1296	0,59	1100	0,50
Año	3947		0,88		0,76

Tabla 1. Producción de energía a lo largo del año para varias inclinaciones y varios niveles de suciedad. Las cifras en letra normal representan Wh al día por kW de generador. Las cifras en cursiva representan relaciones entre las cifras anteriores.

<sup>4</sup> Condiciones CEM: irradiancia = 1000 W/m<sup>2</sup>; temperatura de célula = 25° C.

<sup>5</sup> La corrección de las curvas a CEM se hizo suponiendo que la temperatura de operación de las células era, en ambas disposiciones, igual a la medida en un único sensor. Así, la diferencia entre la tensión de circuito abierto (CEM) de ambas curvas resulta indicativa de la diferencia entre las temperaturas de operación de los generadores.

La tabla 1 muestra la relación entre las producciones de energía estimadas para ambos generadores con distintos grados de suciedad. A la hora de escribir estas líneas aún no ha transcurrido un año desde que se midieron los generadores, pero la venta de energía a lo largo de los meses transcurridos se ajusta más al escenario “muy sucio / suciedad normal” que a los otros. De confirmarse esta tendencia, la producción del generador inclinado a 30° será de 1440 kWh/kW, mientras que la del generador pegado al tejado no será más que de 1095 kWh/kW al año; lejos, como se ve, de los 1500 kWh/kW comentados más arriba. Es decir, el gato se llama esta vez “345 kWh/kW menos al año” (o 152 €/kW al año) y, por saberse donde está, es posible ponerle el cascabel. De esta pérdida, la mitad es debida a la menor inclinación y la otra mitad al polvo.



*Figura 4. Acumulaciones de polvo sobre otro generador instalado sobre cubierta de nave industrial.*

La figura 4 muestra las acumulaciones de polvo sobre otro generador fotovoltaico distinto del que nos ocupa. Me la ha pasado un amigo, y la muestro para que se vea que lo del polvo no ocurre solamente en los tejados que yo visito. En este caso, la pérdida de energía era tan grande que forzó a cambiar la disposición del generador.

La fotografía sirve también para traer a colación el hecho de que el asunto del polvo es muy dependiente del lugar y, muy en particular, de lo que ocurra en sus alrededores. Allí donde los generadores fotovoltaicos tengan cerca “focos de polvo” (camino sin asfaltar, canteras, campos arables, cementeras, etc.) y, por ende, los vientos dominantes sean de tal dirección que favorezca su transporte hacia ellos, habrá que tener los mayores cuidados. Y esta observación es de aplicación general y no sólo a los generadores instalados sobre cubierta.

A mi entender, se pueden asumir pérdidas de energía en muchas situaciones prácticas, como precio a pagar por las ventajas que reportan; pero, eso sí, avisando los pagos desde el principio. Mantener los anuncios de 1500 kWh/kW para la productividad de los generadores fotovoltaicos instalados directamente sobre naves industriales tiene bastante de trampa y de cartón.

También resulta preocupante la tendencia a instalar los generadores sobre cubierta sin tomar las previsiones necesarias para poder acceder a sus componentes, en caso de mantenimiento o avería. Imagine el lector las dificultades que representa localizar, por ejemplo, un mal contacto o un fallo de aislamiento en un generador como el de la fotografía 1, en el que hasta las operaciones más sencillas, como echar un vistazo al cableado o medir la tensión de circuito abierto de un módulo, obligan a poner totalmente patas arriba el generador. Otro gallo cantaría si el diseñador hubiera, por ejemplo, dejado un pasillo –50 cm de ancho hubieran sido suficientes– entre cada dos filas de módulos y, además, hubiese dispuesto el cableado transcurriendo por los bordes del pasillo. ¡Cuánto se lo hubiera agradecido el infortunado operario que tenga que hacerse cargo del mantenimiento!

## De paseo por el suelo

“¿Y no has podido ver al gato en más sitios que en las alturas de los tejados?”, me dijo el lector, ya algo congradulado conmigo por efecto de las fotos y cifras (¡Hay que ver la trascendencia que parece que adquieren las cosas cuando se visten con ropaje de números!), pero todavía algo contrariado, por no ver al gato más que en una situación muy particular y, por ende, peligrosa. “¡Jo! –dijo– ¡es que tener que subirse a los tejados!.. ¿y si me caigo?”

En este punto me vinieron ganas de “amatonarme” y decirle cuatro cosas sobre el coraje, sobre que si se suben los obreros también deben subirse los ingenieros, etc. Pero, en aras de una mayor persuasión, opté, esta vez sí, por soltarle una referencia a un clásico. Le tocó el turno a Juan Luis Vives (1493-1540), el gran humanista español, profesor en Lovaina y Oxford, considerado como precursor de la filosofía empírica en el Renacimiento europeo. En su libro “De tradentis disciplinis” (1531), invita al hombre culto a que “no tenga empacho de acudir a las ventas y a los obradores, y preguntar y aprender de los artesanos las peculiaridades de su profesión; porque de muy atrás los sabios desdeñaron apearse en este plano y se quedaron sin saber una porción incalculable de cosas que tanta importancia tienen para la vida”. Me pareció una cita adecuada para invitar a los ingenieros a que se suban a los tejados. El lector pareció aquietarse, y dijo que la cita le parecía bonita, aunque algo chocante en estos tiempos en los que muchos ingenieros desarrollan querencia por el respaldo de la silla y la pantalla del ordenador.

Así, la autoridad de Juan Luis Vives sirvió para conciliar al lector con los tejados, pero no para calmar definitivamente su paranoia gatuna. No le fue difícil encontrar argumentos para mover ficha. Me dijo: “Eres malo de entender; tu primer artículo (el de 2002) sugería que el gato se aparecía principalmente en forma de potencia real de generadores significativamente inferior al valor nominal. Sin embargo, ahora resulta que el gato se aparece en forma de polvo y, además, para verlo hay que medir una curva que, en corriente, pasa de 200 A y, en tensión, de 700 V”

Pero tampoco me fue difícil a mí encontrar otras razones para mantenerme en mis trece. A lo primero, le contesté que hoy, 5 años después de aquel primer artículo, con unas cuantas medidas y algunos más cotilleos a mis espaldas, me sigue pareciendo lo mismo: que, a pesar de que muchos andan todo el día conjugando la palabreja “flash-list”, como si se tratase de un sésamo cuya mera invocación fuese garantía de que lo que es sea igual a lo que se dice, sigo persuadido de que esto de la potencia real de los generadores deja algunas veces mucho que desear. Y que si he puesto aquí el ejemplo de la figura 3-a, que corresponde a un buen generador<sup>6</sup>, es para que se vea que también hay quien hace las cosas como se debe; pero que en el morral tengo también algunos ejemplos de lo contrario, y que le mostraría uno, aprovechando que debía responder a lo segundo.

Sobre el asunto de las medidas, no dejé pasar la ocasión de expresar mi tristeza por tan poca medida como se hace. Otras familias de la tecnología energética (carboneros, hidráulicos, nucleares, eólicos, etc.) mantienen a este respecto una disciplina encomiable, que los fotovoltaicos deberíamos imitar. Lo de un simple ensayo de recepción con un colchón de más de un 15 % (que no otra cosa es limitarse a exigir valores de *PR* superiores a 0,7), como parece ser la norma más extendida hoy, puede llegar para que un banco se decida a aprobar un pago, pero me parece francamente insuficiente para averiguar lo que ocurre de verdad en las plantas fotovoltaicas. Ya con la boca caliente, también dije que no hay ciencia sin curiosidad, e incluso se me pasó por la cabeza la idea de que el título de ingeniero debería expedirse con puntos, como se hace ahora con el permiso de conducir, e irlos quitando cada vez que el titulado se viese involucrado en un proyecto y no hiciese gala manifiesta de curiosidad.

Así desahogado, pasé a explicarle que lo de enseñar aquí una curva con tantos voltios y amperios –bastantes más de lo que permiten medir los equipos disponibles comercialmente– no era por la vanidad de mostrar lo singular de lo propio, que tampoco es para tanto, sino para que se vea que se puede sin mucho más que ponerse. De hecho, para medir adecuadamente la potencia de un generador, ni siquiera hace falta dotarse de una carga (en nuestro caso, capacitiva) capaz de soportar tales proezas. Hay otras maneras. A mí me gusta la de registrar simultáneamente valores de potencia DC (con un vatímetro comercial<sup>7</sup>) y de irradiancia y temperatura de célula (con un módulo o célula previamente calibrados). Los valores de potencia se deben corregir según la fórmula:

$$P_{DC, CORREGIDA} = \frac{P_{DC, MEDIDA}}{[1 + CVPT(T_C - 25^\circ)]}$$

donde  $T_C$  es la temperatura de operación de las células, expresada en grados centígrados, y  $CVPT$  es el coeficiente de variación de la potencia con la temperatura, que es un valor que figura en el catálogo de los módulos (para módulos convencionales de silicio cristalino oscila normalmente entre  $-0,4\%/^\circ K$  y  $-0,5\%/^\circ K$ ). Después, se representan gráficamente los valores, poniendo la irradiancia en el eje de las abscisas y la potencia corregida en el de las ordenadas. Se ajusta a la nube de puntos así obtenida una recta de

<sup>6</sup> La potencia de este generador es un 3,5 % inferior al valor nominal; pero este valor es francamente pequeño cuando se considera que está medido a la entrada del inversor y que el sensor de irradiancia y de temperatura de célula es un módulo de la misma tecnología y previamente calibrado por el CIEMAT, por lo que ese 3 % debe acomodar a la totalidad de las posibles pérdidas por: calibración del flash, dispersión, polvo y cableado DC.

<sup>7</sup> También se pueden utilizar los valores que indica el propio inversor, pero su precisión, en particular cuando se trata de medidas en DC, suele ser tirando a poca. Además, la utilización de un vatímetro comercial conlleva el apellido de independencia que siempre conviene en estas lides.

la forma  $P_{DC, CORREGIDA} = a \cdot (G/G^*)$ , donde  $G$  representa la irradiancia y  $G^*$  es su valor en CEM ( $1000 \text{ W/m}^2$ ). Entonces, la potencia real en CEM del generador es precisamente el valor del coeficiente  $a$  de esa recta. Conviene mantener el experimento el tiempo suficiente como para recorrer un margen de irradiancias razonable. Por ejemplo, el que presenta la figura 5, se mantuvo desde la tarde de un día hasta el mediodía del día siguiente, y la potencia CEM resultante fue de 27,9 kW.

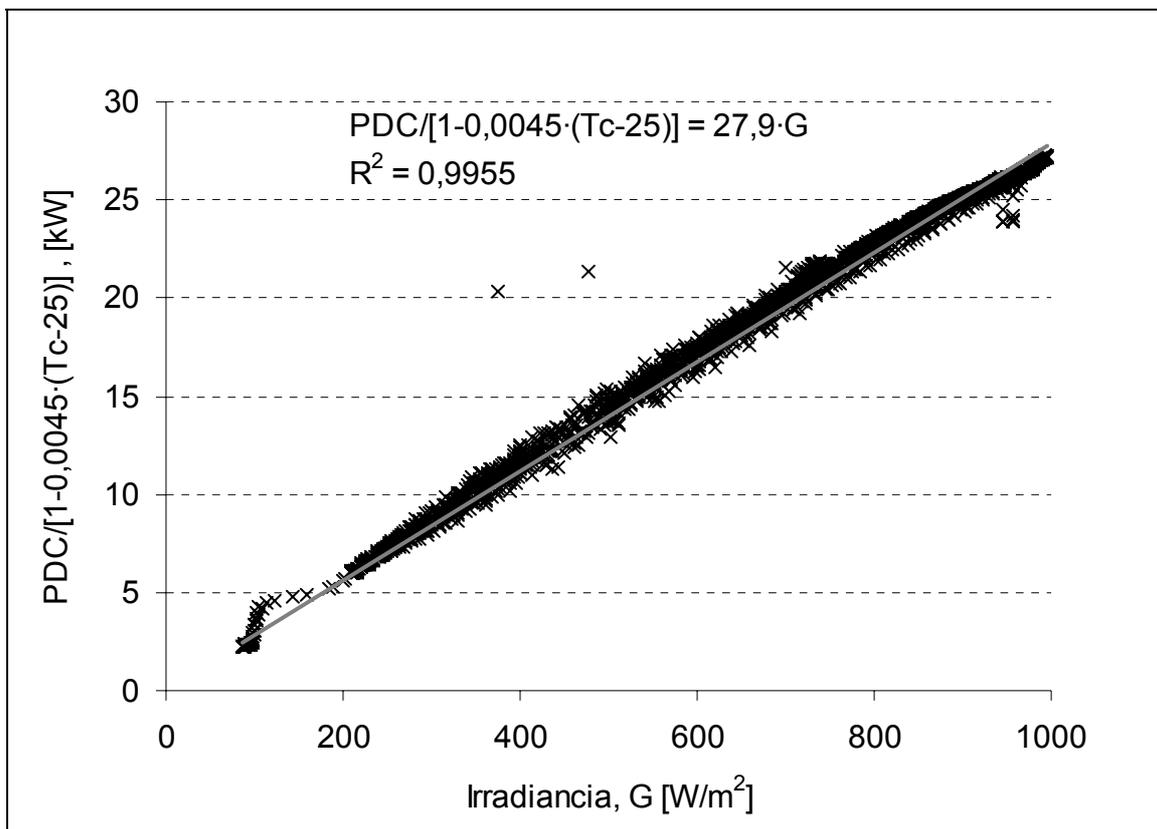


Figura 5. Potencia DC corregida por la temperatura versus irradiancia,  $G$ . El valor correspondiente a  $G^* = 1000 \text{ W/m}^2$  corresponde a la potencia pico del generador tal y como es vista por el inversor, lo que incluye las pérdidas por dispersión, cableado, suciedad y mal seguimiento del punto de máxima potencia.

Y di por concluida la charla con el lector, explicándole que este último ejemplo provenía de un caso real en el que la potencia nominal del generador era de 32 kW. Es decir, un caso en el que la potencia real es un 13 % inferior al valor nominal. “No me negará – le dije – que esto deja bastante que desear”.

Yo sabía que él podría haberme replicado algo así como: “Pero, en rigor, esa no es la verdadera potencia máxima del generador, sino la que extrae el inversor, que quizá no es tan bueno como para seguir siempre el punto de máxima potencia”. Entonces, yo le hubiera respondido algo como: “Tienes razón, pero a efectos de lo que de verdad produce la planta, ésta es precisamente la potencia que importa”. Él podría haber seguido: “Pero así no sabemos de quien es la culpa”. Y yo: “Para tanto detalle hay que recurrir a medir con una carga. Además, lo de la culpa no importa ahora. Se trata de entender más

para ir haciendo mejor; de reconocer que todo, incluso lo de uno mismo, es perfectible, y de divertirse en la humildad de ir haciendo y aprendiendo”.

Pero, afortunadamente, el lector no replicó nada. Sólo dijo: “¡Vaya rollo que me has largado! Total, para contarme que en los tejados hay polvo y que conviene medir lo que se hace”. Yo pensé que tenía razón, porque lo expuesto en mi charla con él no pasó de obviedad. Y por lo mismo creo que ya es hora de ponerle punto final a este retrato.

Lo haré diciendo que los chicos del IES-UPM no somos los únicos que observamos, a veces, discrepancias entre lo que dice la información de los fabricantes de módulos y la realidad. Sin ir más lejos, la Universidad de Jaén y la Universidad Nacional de Educación a Distancia han publicado recientemente un excelente artículo<sup>8</sup> que, con una importante base empírica, demuestra la necesidad de contar con medidas independientes para poder saber la energía que producen los generadores fotovoltaicos.

## Resumiendo

- Los generadores fotovoltaicos instalados sobre cubiertas de naves industriales son particularmente propensos a la acumulación de polvo, de la que pueden derivarse reducciones de más de un 20 % en la energía generada anualmente. Su diseño e instalación deben considerar con cuidado este fenómeno.
- Todos los generadores fotovoltaicos en cuyos alrededores existan “fuentes de polvo” (camino sin asfaltar, tierras arables, canteras, cementeras, etc.) son propensos al mismo fenómeno, y deben ser diseñados con alguna precaución.
- Los generadores con potencia real significativamente inferior al valor nominal tienen una cierta presencia en el mercado. De ahí la conveniencia de que los procedimientos de recepción incorporen algún ensayo específicamente destinado a la medida de este parámetro.

---

<sup>8</sup> M. Fuentes, G. Nofuentes, J. Aguilera, D.L. Talavera and M. Castro, *Application and validation of algebraic methods to predict the behaviour of crystalline silicon PV modules in Mediterranean climates*, Solar Energy, 81 (11), págs. 1396-1408 (2007).