

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

## Seguidores y huertas solares

Eduardo Lorenzo

Instituto de Energía Solar – Universidad Politécnica de Madrid

*“Difícilmente pudiera conseguir, señora, el sol que la flor del girasol su resplandor no siguiera”*

Calderón de la Barca

(*“Casa con dos puertas mala es de guardar”*, 1ª jornada)

### Resumen

Cuando se analiza en términos de energía AC, la ganancia energética que proporcionan los seguidores solares en sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica es significativamente superior a la que indican los análisis en términos de radiación solar incidente. Por ésta y otras razones, cuando están bien hechos, los seguidores solares mejoran el rendimiento energético y económico de tales sistemas.

Por otro lado, la asociación de varios productores fotovoltaicos en “comunidades”, tal y como ocurre en las denominadas “huertas solares”, es un instrumento útil para favorecer el acceso de la población en general a la generación distribuida de electricidad. El papel de los promotores de estas asociaciones debería ser fomentado con decisión.

### Introducción

Cerca de la mitad de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red en España que están por debajo de la frontera de los 5 kilovatios utilizan seguidores solares<sup>1</sup>. Este predominio es ciertamente una peculiaridad española, ya que en el resto de los países que asisten a un mercado fotovoltaico significativo el recurso a los seguidores es poco más que anecdótico, en términos cuantitativos.

En otro orden de cosas, resulta que el grueso de los seguidores españoles están instalados en el seno de las, apropiadamente llamadas, huertas solares que la empresa AESOL ha puesto en marcha en dos poblaciones navarras, Arguedas y Sesma<sup>2</sup>. En ellas se han agrupado 360 propietarios, cada uno con un generador de 6,12 kW y un inversor de 5 kW. Así, la potencia fotovoltaica en ambas alcanza los 2,2 MW, que representa la mitad del total de la potencia insta-

---

<sup>1</sup> Esta frontera hace referencia a la potencia nominal del inversor. Pero nada impide que la potencia nominal del generador sea mayor. De hecho, lo más frecuente es que sea entre un 20 % y un 30 % mayor.

<sup>2</sup> Olite, M, *Huertas solares: Un nuevo concepto de aprovechamiento solar fotovoltaico*, *Era Solar* nº 117, págs. 14-19, diciembre 2003.

lada en España en el sector inferior a 5 kW<sup>3</sup>. Casos similares ocurren en otros lugares. En Madrid, la empresa Instalaciones Dávila promueve 60 sistemas con 381 kW en total. Y se han anunciado nuevos proyectos en Alicante y Zamora.

La asociación de muchos pequeños inversores en proyectos que llegan a la entidad de los megavatios no es una peculiaridad española. Ocurre, por ejemplo, en Austria, donde recientemente se ha puesto en marcha una huerta solar de 420 kW<sup>4</sup>. En ella, cada uno de los 21 inversores dispone de un sistema de 20 kW dotado de seguimiento, y donde el precio de compra está garantizado durante 15 años, a razón de 0,72 euros/kWh. Ejemplos similares pueden encontrarse también en Alemania.

Sin embargo en nuestro país han llamado poderosamente la atención. En los mentideros fotovoltaicos se dice que a la cosa le han salido enconados oponentes. Y no está de más recordar que mentidero no viene de mentira sino de mentar, y que algunas veces lo que se menta es verdad. De hecho, el proyecto de Madrid no tuvo dificultades para asociar sistemas fotovoltaicos en el marco de los programas de ayuda (subvenciones) que la Comunidad promovió en 2001 y 2002, pero las está enfrentando, y muy serias, en la actualidad.

Somos un país habituado a disfrutar de la polémica. De esto hay que alegrarse, porque la polémica fomenta la comunicación y el negocio de los “cafelillos”, que nos proporciona a todos muy buenos ratos. Pero la polémica también abre las puertas a la confusión, y la confusión sólo tiene sentido si es para ser resuelta. De otro modo, se convierte en un freno para la acción bien dirigida y ordenada. Este artículo pretende avanzar hacia esa resolución, para lo que se estructura en torno a tres preguntas bien diferenciadas:

*¿Cuánta es la ganancia energética que proporcionan los seguidores solares?*

*¿Son rentables los seguidores solares?*

*¿Qué ventajas aportan las huertas solares?*

Me apresuro a anticipar que, en mi opinión, los seguidores y las huertas solares son frutos impensados del RD 2818/98, que regula las condiciones de la conexión fotovoltaica a la red en el sistema eléctrico español. El establecimiento de un magno escalón en la prima, que cae de 0,36 euros (60 pta) a 0,18 euros (30 pta) por kWh, cuando la potencia unitaria de los sistemas supera la frontera de los 5 kW, y la articulación de un procedimiento administrativo excesivamente complejo para la pequeña entidad de las instalaciones individuales, han servido de tierra de cultivo. La semilla ha venido de la mucha imaginación y dinamismo de nuestro sector industrial, en el que afortunadamente las iniciativas de importancia no se limitan a las que puedan tomar los fabricantes de células solares. Hay que felicitarlos de que también otros hagan gala de afrontar los riesgos de la vida con coraje y buen hacer. El fruto ha sido que el resultado más visible de un real decreto que pretendía el fomento de pequeñas instalaciones, totalmente individualizadas y muy diseminadas –para eso fue concebido el fuerte escalón en la prima a la electricidad vendida a la red–, lo constituyen las mencionadas huertas solares, de apariencia similar a la de grandes centrales. Justo lo contrario de lo que se pretendía conse-

---

<sup>3</sup> En el Registro de productores en régimen especial de la Subdirección General de Energía Eléctrica, a diciembre de 2003, hay inscritas 1049 instalaciones fotovoltaicas de potencia inferior a 5 kW, lo que totaliza 4,33 MW de potencia de inversores.

<sup>4</sup> *Photon International*, nº 10, pág. 10, 2003.

guir. Y de ahí que puedan ser ciertos los dichos de los mentideros. El resquemor interno que causa el ver que al vecino se la ha ocurrido algo antes que a uno, y que además le ha salido bien, también debe colaborar al encono contra las huertas solares. Que la envidia es la antesala del resentimiento y, poco o mucho, todos hemos envidiado alguna vez.

Por cierto, lo que si constituye una peculiaridad española es el brusco escalón en la prima al sobrepasar la frontera de los 5 kW. Por poner un contraste, en Alemania, que en estos momentos revisa los pormenores de la Ley de Energías Renovables –ésta que ya ha conducido a la instalación de 300 MW fotovoltaicos– discute sobre una reducción del 10 % en el precio de compra al sobrepasar la frontera de los 30 kW. Y pueden creerme al decir que el traer aquí este ejemplo no es por afán imitador de lo de afuera; que a este pecado siempre he sido poco propenso, y en lo que se refiere al mandamiento fotovoltaico ni siquiera sufro de tentaciones, sencillamente porque lo de dentro se me antoja tan apetitoso o más que lo de afuera. Pero es que a lo del escalón de aquí no consigo encontrarle ni la gracia ni las razones (si alguien sabe que estén escritas en algún sitio, le agradecería mucho que me lo dijera). Lo de mirar afuera era por ver si las encontraba allí. Pero tampoco.

### *¿Cuánta es la ganancia energética que proporcionan los seguidores solares?*

Algunas preguntas no pueden tener una respuesta muy precisa, simplemente porque están influidas por factores que no pueden predecirse totalmente. Como consecuencia, la respuesta está teñida de incertidumbre, y debe expresarse como una gama de valores posibles, mejor que como un valor único. Es el caso de la pregunta que nos ocupa. Una vez fijado el lugar, los factores que asocian incertidumbre son, al menos, tres: la radiación solar, la suciedad de los generadores fotovoltaicos y la calidad del inversor. Por otro lado, la ganancia que proporcionan los seguidores varía de un lugar a otro, como consecuencia de las variaciones de latitud y de clima solar.

Para verlo, comenzaremos analizando el caso de un seguidor ubicado en Madrid. Un programa de ordenador de factura propia, que trabaja en base horaria y considera efectos como la anisotropía de la radiación difusa, el impacto del polvo en las pérdidas por reflexión y las ineficiencias de los inversores, ha permitido calcular la correspondiente ganancia energética para rangos posibles de esos fenómenos. El Anexo incluye unas tablas con los resultados concretos de los cálculos, que pueden ser del interés de algunos. Pero para la discusión que sigue no será preciso atender a tantos detalles como figuran en ellas. Por eso, el texto incorpora otras tablas, extractadas de aquéllas, con menos detalles.

Entre las del Anexo y las del texto, este artículo tiene muchas tablas, lo que rompe con la tradición de anteriores “*Retratos de la conexión...*”<sup>5</sup> y pudiera hacer difícil su lectura. Sin embargo, el texto está pensado para que pueda leerse también de corrido, es decir, sin parar mientes en tabla alguna. De haber logrado mi propósito, este artículo permitirá varias lecturas, adaptadas a varios tipos de lectores: desde el que sólo quiere atender a las ideas generales, hasta el que puede estar interesado en los resultados concretos de un determinado supuesto. Y también debe satisfacer mi apetencia de mostrar, con un ejemplo práctico, la mucha distancia que hay entre cálculos y predicciones cuando se trata de energía solar.

---

<sup>5</sup> *Era Solar* 113, 115 y 117.

## El efecto de la radiación

No hay que insistir en que, por muy bien que se conozca el pasado, el futuro no se puede predecir con total exactitud (afortunadamente, porque si no la vida consistiría en una aburrida repetición). Por eso decimos, con razón, que la radiación solar es esencialmente aleatoria. Para considerar esta aleatoriedad he buscado los parámetros característicos del clima solar de Madrid en diferentes fuentes de información, y he asumido que los correspondientes “años típicos”, descritos cada uno por 12 valores del promedio mensual de la irradiación diaria horizontal, representan diferentes posibilidades de ocurrencia futura.

La tabla 1 presenta los años típicos de Madrid, tal y como aparecen en las ocho fuentes de información que he podido manejar. Se pueden observar diferencias significativas entre ellos. Por ejemplo, para el mes de enero llegan hasta el 32 %  $[(2,29 - 1,73) / (1,73 \times 100)]$ . Sin embargo, y esto es una consecuencia ineludible del carácter aleatorio de la radiación solar, no es posible decir que uno de los años típicos sea más representativo que otro<sup>6</sup>. El futuro puede ajustarse a cualquiera de ellos con la misma probabilidad.

Ref	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
i	1,86	2,94	3,78	5,22	5,80	6,53	7,22	6,42	4,69	3,17	2,08	1,64	4,29
ii	1,99	2,64	4,32	5,32	6,28	7,29	7,47	6,62	5,11	3,40	2,16	1,72	4,53
iii	2,29	2,81	4,48	5,25	6,60	7,24	7,55	6,33	5,22	3,62	2,10	1,64	4,60
iv	2,00	2,80	4,40	5,40	6,60	7,40	7,80	7,00	5,40	3,60	2,60	1,80	4,70
v	1,73	2,63	4,15	5,45	6,17	6,69	7,22	6,49	4,80	3,16	1,99	1,77	4,36
vi	2,00	2,91	3,92	5,34	6,31	6,95	7,09	6,31	4,73	3,30	2,18	1,74	4,41
vii	2,13	2,75	4,55	5,10	6,58	7,43	7,42	6,48	5,00	3,39	2,13	1,58	4,55
viii	1,94	2,76	4,05	4,84	5,79	6,47	7,05	6,24	4,87	3,07	1,98	1,61	4,23

- i Censolar – *International H-World*
- ii Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid
- iii Comisión Europea – *Climatic Data Handbook*
- iv Instituto Nacional de Meteorología – *Atlas de la Radiación Solar en España*
- v Comisión Europea – *Atlas de la Radiación Solar en Europa*
- vi Universidad de Valencia – *Soleamiento y Energía Solar*
- vii *Meteonorm versión 4.0*
- viii NASA (eosweb.larc.nasa.gov/see)

Tabla 1. Valores medios de la irradiación global diaria horizontal en la ciudad de Madrid, en kWh/m<sup>2</sup>, según diferentes publicaciones.

La tabla 1-A (del Anexo) presenta, para cada uno de estos años típicos de Madrid, los resultados de calcular la ganancia energética que proporciona el seguimiento solar, entendida como la relación entre la irradiación anual incidente sobre la superficie que sigue al Sol y la irradiación anual incidente sobre una superficie estática, orientada al Sur e inclinada un ángulo óptimo sobre la horizontal. El ejercicio se ha extendido a 4 tipos de seguimiento:

<sup>6</sup> E. Lorenzo and L. Narvarte, *On the Usefulness of Stand-Alone PV sizing Methods*, Prog. Photovolt: Res. Appl. 2000; 8:391-409.

- *En dos ejes.* La superficie se mantiene siempre perpendicular al Sol.
- *En un eje polar.* La superficie gira sobre un eje orientado al Sur e inclinado un ángulo igual a la latitud. El giro se ajusta para que la normal a la superficie coincida en todo momento con el meridiano terrestre que contiene al Sol. La velocidad de giro es de 15° por hora, como la del reloj.
- *En un eje azimutal.* La superficie gira sobre un eje vertical. El ángulo de inclinación de la superficie es constante e igual a la altitud. El giro se ajusta para que la normal a la superficie coincida en todo momento con el meridiano local que contiene al Sol. La velocidad de giro es variable a lo largo del día.
- *En un eje horizontal.* La superficie gira sobre un eje horizontal y orientado en dirección norte-sur. El giro se ajusta para que la normal a la superficie coincida en todo momento con el meridiano terrestre que contiene al Sol.

Una forma particularmente conveniente de caracterizar un año solar es mediante el llamado “índice de claridad”, definido como la relación entre la irradiación anual sobre una superficie horizontal situada en la Tierra y la irradiación anual sobre una superficie horizontal situada fuera de la atmósfera. Este parámetro, propuesto originariamente por Liu y Jordan<sup>7</sup>, mide la transparencia de la atmósfera, y en él se apoyan la mayoría de los métodos para estimar la radiación sobre superficies inclinadas.

La tabla 2 (extractada de la 1-A) presenta los valores medios anuales de la irradiación diaria sobre superficie horizontal,  $G_{da}(0)$ , sobre una superficie inclinada un ángulo óptimo, *est*, y sobre una superficie dotada de seguimiento azimutal, *Ixa*. Del primero se deduce el índice de claridad<sup>8</sup>, y de los otros, la ganancia asociada a este seguimiento en particular, *Ixa/est*, que también incluye la tabla 2. Como era de esperar, la ganancia del seguimiento crece conforme lo hace el índice de claridad. Mayor claridad indica mayor proporción de radiación directa, precisamente la que maximiza el seguimiento. El rango de valores para la ganancia energética va de 1,31 a 1,35. Pero ésta se refiere sólo a la radiación que incide sobre la superficie de los seguidores. Para llegar a la electricidad que se inyecta a la red, aún hay que recorrer algunos pasos.

	Fuente de información							
	Censolar	IES	CE-H	INM	CE-Atl.	U. Val.	Meteon.	NASA
$G_{da}(0)$	4287	4537	4605	4744	4364	4406	4556	4231
$K_{Ta}$	<b>0,554</b>	<b>0,586</b>	<b>0,595</b>	<b>0,613</b>	<b>0,564</b>	<b>0,569</b>	<b>0,589</b>	<b>0,547</b>
<i>Ixa</i>	6494	7016	7200	7505	6627	6760	7055	6376
<i>est</i>	4945	5259	5388	5577	5013	5117	5282	4875
<i>Ixa/est</i>	<b>1,313</b>	<b>1,334</b>	<b>1,336</b>	<b>1,346</b>	<b>1,322</b>	<b>1,321</b>	<b>1,336</b>	<b>1,308</b>

Tabla 2. Relación entre el índice de claridad anual,  $K_{Ta}$ , y la ganancia proporcionada por el seguimiento azimutal en Madrid, *Ixa/est*, en términos de radiación incidente sobre las superficies. Los valores referidos como  $G_{da}(0)$ , “*Ixa*” y “*est*” son, respectivamente, las medias anuales de la irradiación diaria incidente sobre una superficie horizontal, otra que sigue al Sol y otra estática, y están expresados en Wh/m<sup>2</sup>.

<sup>7</sup> Liu B. Jordan J., *Sol Energy* 4, págs. 1-19, 1960.

<sup>8</sup> Para ello sólo hace falta saber que el promedio anual de la irradiación extra-atmosférica diaria horizontal para la latitud de Madrid es 7738 Wh/m<sup>2</sup>.

Antes, tiene interés hacer notar que de un año a otro (de una fuente de información a otra) los valores absolutos calculados para la irradiación incidente pueden variar tanto como un 17 %  $[(7505 - 6376) / 6376]$ . Sin embargo, la ganancia asociada al seguimiento permanece prácticamente constante, con variaciones inferiores al 3 %  $[(1,346 - 1,308) / 1,308]$ . Esto sugiere proseguir en el análisis de la ganancia manejando un solo año típico, elegido como se quiera. Sin embargo, este artículo persevera en el manejo de todos ellos, como un truco didáctico par fomentar la idea de que el concepto de incertidumbre debe estar siempre presente en cualquier análisis de radiación solar. La incertidumbre aparece siempre que el resultado de un cálculo se utiliza como predicción para el futuro. El cálculo puede ser tan preciso como se quiera, la predicción, no. Lamentablemente, esto se olvida con mayor frecuencia cada vez. Se diría que la profusión de ordenadores y softwares<sup>9,10</sup> está haciendo desaparecer la palabra “aproximadamente” del lenguaje cotidiano. Manejar varios resultados para una misma predicción, como se hace a lo largo de este artículo, pretende ir en contra de esta olvidadiza corriente.

En consonancia con esto mismo, cabe una advertencia sobre el número de cifras con que se presentan los resultados. En tanto cálculos procedentes de simulaciones, se pueden poner tantas como se desee (aquí hemos llegado hasta el vatio-hora para las irradiaciones, y hasta la tercera cifra decimal para las ganancias). Pero en tanto predicciones, hay que considerar sólo las que son significativas (como mucho, hasta las centenas de vatio-hora para las irradiaciones y hasta la segunda cifra decimal para las ganancias).

A modo de paréntesis, la tabla 1-A pone de manifiesto que el seguimiento azimutal colecta un 7% menos de radiación que el seguimiento en dos ejes, y un 4% menos que el seguimiento polar. Sin embargo, el tener un solo eje de giro y el que éste sea vertical, hacen que la mecánica de los seguidores azimutales sea particularmente sencilla y robusta. Para muchos, esta ventaja compensa con creces la menor colección de radiación, por lo que son los más utilizados en la práctica. Más sencilla aún es la mecánica de los seguidores horizontales, pero la radiación solar que colectan es significativamente menor (hasta un 12 % menos que la correspondiente al seguimiento en dos ejes). Su uso resulta atractivo cuando se trata de superficies muy grandes (por ejemplo, cada uno de los cuatro seguidores horizontales integrados en la central fotovoltaica Toledo-PV tiene una superficie de 250 m<sup>2</sup>) o de latitudes muy pequeñas. Pero ninguna de estas condiciones concurren en el mercado fotovoltaico español (AESOL emplea seguidores azimutales, Instalaciones Dávila utiliza el seguimiento en dos ejes).

En lo que sigue, este artículo restringe sus comentarios al seguimiento azimutal. No obstante, las tablas del Anexo recogen también cálculos correspondientes a los otros tipos de seguimiento. Por último, importa comentar que, en rigor, el seguimiento azimutal puede implementarse con ángulos de inclinación distintos de la latitud. Sin embargo, el óptimo de inclinación coincide prácticamente con la latitud en todos los casos que conocemos<sup>11</sup>.

---

<sup>9</sup> M. Castro, F.J. Argul, J.A. Rodríguez, A. Colmenar, A. Vara, J. Carpio, J. Peire, *Era Solar* 85, pg. 19-30, 1998.

<sup>10</sup> Werner Knaupp, *Market Survey of simulation programs for PV systems*, Photon International 9, 52-59, 2003.

<sup>11</sup> E. Lorenzo, M. Pérez, A. Ezpeleta and J. Acedo, *Prog. Photovolt: Res. Appl* 10, págs. 533-543, 2002.

## El efecto de la suciedad

Inherente a la exposición permanente a la intemperie, un cierto grado de suciedad cubre siempre la superficie de los receptores solares. Quizás porque no evoca connotaciones “científicas”, la suciedad recibe tradicionalmente poca atención en los tratados sobre sistemas fotovoltaicos. Sin embargo, su efecto es mayor de lo que muchos imaginan, porque no se limita a tapar una cierta proporción de la superficie receptora. También acorta el ángulo límite de incidencia, por encima del cual la radiación solar no llega a las células sino que se pierde por reflexión en la cara externa del vidrio que las protege.

Afortunadamente, contamos con una tesis doctoral<sup>12,13</sup>, particularmente elegante, que propuso un modelo adecuado para estudiar el efecto de la suciedad. Aquí se ha utilizado para estimar el impacto energético de tres grados distintos de suciedad, definidos como baja (superficie cubierta<sup>14</sup> = 2 %), moderada (3 %) y alta (7 %). Los resultados se muestran en las tablas 2-A, 3-A y 4-A del Anexo, de las que se ha extractado aquí la tabla 3.

Como también era de esperar, el impacto energético de la suciedad es menor en un receptor que sigue al Sol que en uno estático. La razón es que el seguimiento hace que, en su conjunto, el ángulo de la incidencia de la radiación solar disminuya y, por tanto, que la proporción perdida por sobrepasar el ángulo límite mencionado anteriormente también disminuya. Como consecuencia, el rango de valores esperables para la ganancia de la radiación que efectivamente llega a las células solares crece conforme lo hace el grado de suciedad. El rango de valores de ganancia pasa de 1,31-1,35 a 1,36-1,4 cuando el generador pasa de estar totalmente limpio a estar bastante sucio.

Suciedad	Fuente de información							
	Censolar	IES	CE-H	INM	CE-Atl.	U. Val.	Meteon.	NASA
<i>Ninguna</i>	1,313	1,334	1,336	1,346	1,322	1,321	1,336	1,308
<i>Baja</i>	1,346	1,368	1,370	1,380	1,355	1,354	1,370	1,340
<i>Moderada</i>	1,349	1,371	1,373	1,383	1,358	1,357	1,373	1,343
<i>Alta</i>	1,366	1,389	1,391	1,401	1,376	1,374	1,391	1,360

Tabla 3. Impacto de la suciedad en la ganancia proporcionada por el seguimiento azimutal en Madrid, en términos de la radiación efectiva que llega a incidir en las células solares.

Obviamente, de aquí no hay que inducir que convenga ensuciar las superficies de los seguidores para aumentar la ganancia con respecto a las superficies estáticas, ya que ensuciar siempre va en demérito de la producción energética. Lo que indican estas cifras es, simplemente que, para mantener iguales producciones, una superficie que sigue al Sol requiere ser limpiada con menor frecuencia que una estática.

<sup>12</sup> N. Martín Chivilet, *Estudio de la influencia de la reflexión, el ángulo de incidencia y la distribución espectral de la radiación solar en los generadores fotovoltaicos*, Leída en la Universidad Politécnica de Madrid, 1999.

<sup>13</sup> Martín N, Ruiz J, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 70, 25-38, 2001.

<sup>14</sup> El porcentaje de la superficie cubierta coincide con el complementario de la transmitancia a incidencia normal,  $T_n$ . Por tanto, los valores de  $T_n$  correspondientes a los tres grados de suciedad considerados aquí son 0,98, 0,97 y 0,93, respectivamente.

Por lo general, y salvo celebraciones extraordinarias como inauguraciones, seminarios, bodas, etc., los generadores fotovoltaicos no se limpian más que cuando llueve y de forma natural. La suciedad proviene de diversas fuentes (polvo, arena, excrementos de pájaro, etc.), y evoluciona incontroladamente a lo largo del año. En mi opinión, el caso denominado aquí como de suciedad alta es el más representativo de la realidad general. Por esta razón, el análisis que sigue en este artículo se restringe precisamente a este caso. Para llegar a la electricidad inyectada a la red, no queda más que considerar el impacto del seguimiento en la eficiencia de las células solares y del inversor.

### *El efecto de la eficiencia de las células solares*

En general, el seguimiento hace que las células solares reciban más radiación. Con ello, su temperatura de trabajo aumenta, y su eficiencia decrece ligeramente. Este efecto en células de silicio cristalino es del orden de  $-0,4\%/^{\circ}\text{C}$ . Por ejemplo, la eficiencia de un módulo fotovoltaico, que en condiciones estándar (temperatura de células =  $25^{\circ}\text{C}$ ) es del 15 %, se reduce hasta el 13 % cuando la temperatura de éstas sube a  $60^{\circ}\text{C}$ :  $15 \times [1 - (60 - 25) \times 0,4/100] = 12,9$ .

A su vez, la temperatura de las células<sup>15</sup> depende de la radiación incidente y de la temperatura ambiente. La evolución de esta última constituye una fuente más de incertidumbre en la predicción del comportamiento de los ingenios solares. Sin embargo, la ligazón entre eficiencia y temperatura es más bien débil, lo que hace que en la práctica también lo sea la incertidumbre correspondiente. Volviendo al módulo del ejemplo anterior, un descenso tan fuerte como de  $10^{\circ}\text{C}$  en la temperatura ambiente solo eleva la eficiencia del 13 % al 13,5 %. Por eso, no se ha considerado aquí más que un sólo caso para la evolución anual de la temperatura ambiente. Con él se ha analizado el efecto del seguimiento en la ganancia energética, esta vez en términos de la energía DC entregada por los generadores fotovoltaicos. La tabla 5-A del Anexo presenta los resultados obtenidos para el caso de suciedad elevada. De las tablas 4-A y 5-A, se ha extractado aquí la tabla 4, que compara la ganancia asociada al seguimiento azimutal, en términos de la radiación efectiva sobre las células solares y de la energía DC que generan. Como se puede comprobar, ambas son muy parecidas (las diferencias son inferiores al 1 %), por lo que cabe concluir que el impacto de la eficiencia de las células sobre la ganancia energética de los seguidores es siempre muy pequeño.

<i>I<sub>xa/est</sub></i>	Fuente de información							
	Censolar	IES	CE-H	INM	CE-Atl.	U. Val.	Meteon.	NASA
Radiación efectiva	1,366	1,389	1,391	1,401	1,376	1,374	1,391	1,360
Energía DC	1,358	1,380	1,381	1,391	1,367	1,366	1,381	1,352

Tabla 4. Impacto de la eficiencia de las células en la ganancia proporcionada por el seguimiento azimutal en Madrid. Se presenta la relación con un generador estático, tanto en términos de la radiación efectiva que llega a incidir en las células solares, como en términos de la energía DC generada por éstas.

<sup>15</sup> Como regla general, la temperatura de las células se eleva por encima de la temperatura ambiente una cantidad que es directamente proporcional a la irradiancia incidente. Un incremento de  $30^{\circ}\text{C}$  por 1000 W de irradiancia es una buena estimación para las tecnologías de encapsulado actuales. Así, por ejemplo, las células alcanzarán los  $60^{\circ}\text{C}$  con una temperatura ambiente de  $36^{\circ}\text{C}$  y una irradiancia de  $800\text{ W/m}^2$ .



### *El efecto de la eficiencia del inversor*

El incremento de la radiación asociado al seguimiento hace subir la relación entre la potencia de trabajo y la potencia nominal de los inversores. El efecto sobre la eficiencia de la conversión de energía DC en AC depende de las características particulares del inversor y de su tamaño relativo respecto al generador. Aunque pueden imaginarse situaciones diferentes, en general, la eficiencia energética tiende a subir cuando lo hace esa relación.

La tabla 6-A del Anexo presenta los cálculos correspondientes a un inversor representativo de la tecnología actual. La tabla 5 aquí mostrada compara la ganancia energética asociada al seguimiento azimutal, tanto en términos de la energía DC que producen los generadores como en términos de la energía AC que entrega el inversor. Las diferencias son significativas, ligeramente superiores al 7%, a favor de la producción AC.

<i>I<sub>xa</sub>/est</i>	Fuente de información							
	Censolar	IES	CE-H	INM	CE-Atl.	U. Val.	Meteon.	NASA
Energía DC	1,358	1,380	1,381	1,391	1,367	1,366	1,381	1,352
Energía AC	1,421	1,442	1,446	1,437	1,435	1,432	1,432	1,403

Tabla 5. Impacto de la eficiencia de los inversores en la ganancia proporcionada por el seguimiento azimutal. Se presenta la relación con un generador estático, tanto en términos de la energía DC que producen las células solares, como en términos de la energía AC que entrega el inversor.

### *El efecto del lugar*

De un lugar a otro pueden variar la latitud y el índice de claridad. La primera afecta a la geometría de la incidencia de la radiación, el segundo a las proporciones de directa y difusa que constituyen la radiación global, y ambas afectan a la ganancia energética de los seguidores.

La tabla 7-A del Anexo presenta la ganancia de los diferentes tipos de seguimiento en diferentes lugares de la geografía española. De ella se ha extractado aquí la tabla 6, que restringe la presentación al seguimiento azimutal. La fuente de información ha sido en todos los casos la de Censolar.

Navarra, en atención a que concentra el grueso de las huertas solares, recibe el distinguo de considerar dos fuentes de información adicionales: la accesible en [eosweb.larc.nasa.gov/see](http://eosweb.larc.nasa.gov/see), y otra procedente de los datos recogidos por la estación meteorológica Montes del Cierzo, que fue precisamente la utilizada en el diseño de la central fotovoltaica que EHN ha instalado en Tudela.

Lugar	Latitud (°)	$K_{Ta}$	$E_{ACa} (est)$	$E_{ACa} (Ixa)$	$Ixa/est$
Alicante	38,4	0,587	4006	5651	1,410
Almería	36,9	0,582	3976	5535	1,392
Asturias	43,4	0,407	2570	3279	1,276
Barcelona	41,4	0,492	3194	4397	1,376
Huelva	37,3	0,608	4052	5797	1,431
Jaén	37,8	0,553	3599	5026	1,396
Las Palmas	28,2	0,553	3847	5019	1,295
Lugo	43,0	0,467	2913	3955	1,357
Madrid	40,4	0,554	3605	5121	1,421
Zamora	41,5	0,529	3341	4738	1,418
Navarra (Censolar)	42,8	0,467	2919	3989	1,367
Navarra (Nasa)	42,1	0,501	3182	4413	1,387
Navarra (M. del Cierzo)		0,608	4005	5853	1,461

Tabla 6. Ganancia energética proporcionada por el seguimiento azimutal en varios lugares de la geografía española. Cada lugar se caracteriza por su latitud e índice de claridad,  $K_{Ta}$ .  $E_{ACa} (est)$  y  $E_{ACa} (Ixa)$  representan los promedios anuales de la energía inyectada diariamente en la red, expresados en Wh por cada kilovatio de potencia nominal de generador.  $Ixa/est$  representa la ganancia del seguimiento. Salvo las indicaciones expresas para el caso de Navarra, la fuente de información ha sido la de Censolar.

Un examen atento de la tabla 6 revela como la ganancia del seguimiento crece con la latitud y con el índice de claridad. Restringiéndonos a la base de información de Censolar, el rango de valores calculados va desde 1,28 hasta 1,43. El valor intermedio de este rango es 1,36.

### *Las huertas de AESOL*

El caso de Navarra es un tanto especial porque las estimaciones, derivadas de las distintas fuentes de información, sobre la energía inyectada anualmente en la red difieren hasta en un 46 % [(5853 – 3989) / 3989]. Muy probablemente, esta diferencia tan extrema se debe a que la estación de donde provienen los datos en los que se apoya la información de Censolar tiene un clima notablemente diferente al de la estación de Montes del Cierzo. Quizás la primera está cercana a un río y, en consecuencia, se ve afectada por la niebla con mucha mayor frecuencia y persistencia que la zona del Cierzo. Los datos de NASA derivan de fotografías tomadas por satélite, e indican lo que en promedio ocurre en un área geográfica de 280 km × 280 km. En definitiva, las diferencias de la tabla 6 parecen indicar que la zona de los Montes del Cierzo constituye un microclima en el que la insolación es particularmente elevada.

Las estimaciones para la ganancia del seguimiento son bastante más consistentes, entre 1,37 y 1,46.

Según datos que me han sido proporcionados por AESOL, la producción real de las huertas solares de Árguedas y Sesma ha sido de 11 500 kWh al año por cada sistema de 6,12 kW de potencia nominal. Esto significa 1880 kWh/kW al año, o un promedio anual de 5148 Wh/kW al día. Esta productividad es intermedia entre las estimaciones derivadas de los datos de NASA y de Montes del Cierzo. En mi opinión, que admito arriesgada, lo más probable es que, por un lado, la potencia real de los generadores sea ligeramente inferior a la nominal y que, por otro, la irradiación anual en las huertas haya sido ligeramente inferior a lo que indican las informa-

ciones procedentes de la estación de Montes del Cierzo. Con ello, la ganancia energética asociada al seguimiento habrá sido ligeramente superior a 1,4. Sea como sea, las cifras absolutas llevan a concluir que los lugares donde se ubican las huertas están realmente bien elegidos, y que los sistemas fotovoltaicos de AESOL funcionan francamente bien.

### *Resumen*

La pregunta de cuál es la ganancia energética esperable de un seguidor solar no tiene una respuesta inmediata y precisa. El carácter aleatorio de la radiación solar, la evolución de la suciedad en las superficies receptoras y las eficiencias de conversión de células solares e inversores, hacen que puedan esperarse valores en un rango relativamente amplio. En el caso de seguidores azimutales ubicados en Madrid, este rango va desde 1,31 hasta 1,45. El extremo inferior corresponde a años de baja insolación, superficies muy limpias e inversores con respuesta muy plana, mientras que el superior corresponde a años con mucha insolación, superficies bastante sucias e inversores convencionales. Una consecuencia importante del carácter aleatorio de la radiación solar es que, para un mismo lugar, existen diferentes fuentes de información cuyo contenido diverge notablemente.

Por otra parte, la ganancia esperable de un seguidor varía de un lugar a otro, conforme varían la latitud y el índice de claridad. Aun ateniéndose a una única fuente de información para la radiación solar (lo que supone tanto como obviar su carácter aleatorio), las estimaciones para unos cuantos lugares de España varían entre 1,27 y 1,42.

Teniendo en cuenta todos los factores, el rango de valores que es razonable esperar en la práctica, cuando se contemplan muchos años y toda la geografía española, va desde 1,25 hasta 1,47. ¡Mucha incertidumbre para algunos!, aunque yo debo confesar que me siento a gusto con esta situación. Quizás sea por mis orígenes gallegos. Ya se sabe que nosotros tenemos fama de sentir más acomodo en lo dubitativo que en lo preciso. Pero, al margen de si los gallegos somos más dados a la duda o a la “empanada”, lo que si es cierto es que la incertidumbre está ahí, y que no hay otro modo de reducirla que apelando a lo empírico, es decir, anotando y analizando sistemáticamente lo que ocurre en la realidad real, y no en la virtual. Que por muy apegados a las dudas que podamos estar los gallegos, en esto de las realidades no nos confundimos. Insistir en la conveniencia de interrogar a la realidad fue la aportación esencial de Galileo Galilei<sup>16</sup>, en el siglo XVII, y todos los científicos posteriores a él suelen presumir de hacerle caso. Sin embargo, en el mundillo de la conexión fotovoltaica a la red, el caso se limita a lo de anotar. Hay cientos de equipos automáticos de adquisición de datos distribuidos por los sistemas fotovoltaicos españoles, y todos ellos anotan sistemáticamente una cantidad verdaderamente aparatosa de números. Pero lo de analizarlos suele, primero, posponerse (¡Ya habrá tiempo!) y después relegarse (¡No hay tiempo!). Como resultado, se publica mucho sobre lo que se hace, pero casi nada sobre como funciona en realidad eso que se hace. Esto ya lo he dicho en otros artículos. Lo repito porque soy de natural pesado, pero también porque sigue siendo cierto.

---

<sup>16</sup> Galileo ha pasado a la fama por haber sido obligado por la Inquisición a abjurar públicamente de su creencia de que la Tierra se movía en torno al Sol. Sin embargo, eso no era idea suya. Se le había ocurrido a Copérnico noventa años antes, y Galileo lo que hizo fue repetirlo con cierta altanería. Y como contra el delito de altanería no había nada escrito, decidieron acusarlo de hereje.

Volviendo a los seguidores azimutales, la cifra del 35 % que se acostumbra a citar en el mundo fotovoltaico español, se sitúa en los intermedios de los rangos mencionados anteriormente, y puede ser considerada como razonablemente representativa de la situación general. A esta costumbre nos acogeremos para abordar la segunda de las cuestiones planteadas en este artículo.

### ***¿Son rentables los seguidores solares?***

#### *Rentabilidad económica*

Por rentabilidad a secas se sobreentiende rentabilidad económica. En el caso de los ingenios energéticos, esta rentabilidad depende de las condiciones de compra de la energía que impone el marco regulador del sistema eléctrico. Desde el punto de vista del inversor, la rentabilidad viene determinada por la relación entre la productividad energética de un sistema y el precio que debe pagar por él. Casi con independencia de cual sea el parámetro usado para cuantificar la rentabilidad (VAN, TIR...), la relación energía/precio aparece como el factor fundamental.

Como quiera que el añadido de un seguidor a un generador fotovoltaico afecta tanto al precio como a la energía, la pregunta de si resulta o no rentable se responde atendiendo, simplemente, a cómo se afecta esa relación. Si la ganancia en energía es superior al incremento en el precio, el seguidor es rentable. Por tanto, y a la vista de lo comentado en el apartado anterior, podríamos decir, como idea de principio, que el uso de seguidores azimutales tiene sentido si el incremento que representan en el precio total del sistema es inferior al 35 %.

Sin embargo, el brusco escalón en el precio de compra de la energía que impone el RD 2818, al traspasar la frontera de los 5 kilovatios, introduce un elemento añadido al criterio anterior. El seguimiento permite aumentar la energía producida sin sobrepasar esa frontera por lo que, incluso en el caso de que el incremento en el precio del sistema fuese igual al de la energía producida, los seguidores tienen sentido como forma de ampliar las fronteras de la inversión. En efecto, un cliente que desee invertir más de lo que cuesta un sistema estático de 5 kW, pierde –y mucha– rentabilidad si dirige su inversión a incrementar la potencia de su sistema, ya que pasa de cobrar 0,40 €/kWh a sólo 0,22 €/kWh. Sin embargo, mantiene la rentabilidad si dirige su inversión a un seguidor. Esto fue una de las cosas que nadie pensó o, por lo menos, que nadie dijo, cuando la elaboración del dichoso RD 2818.

En el contrato de compraventa que firman los propietarios de las huertas solares que promueve AESOL se especifica que el seguidor incrementa el precio del sistema en un 25 %, y la producción de energía en un 30 %. Además, cada propietario accede a un sistema con una potencia de inversor de 5 kW. Por lo tanto, hay en este caso un doble motivo para presuponer que los seguidores sean rentables. Para que lo sean de verdad falta confirmar el incremento en la producción de energía a largo plazo, y que su operación sea fiable y no suponga costes significativos de mantenimiento.

Lo primero debe ser fácil porque, como hemos visto, la ganancia energética esperable en Navarra (tabla 6) está por encima del 35 %. Lo segundo tampoco debe resultar difícil. En definitiva, un seguidor se mueve muy poco (una vuelta al día equivale a 7300 vueltas en 20 años; que son menos de las que da el motor de un coche para recorrer 10 km), por lo que su fiabili-

dad no está asociada a la resistencia al desgaste, sino a la resistencia a las condiciones anormales (vientos muy fuertes y turbulentos, fallos en la alimentación, etc.). Los seguidores de la central fotovoltaica Toledo-PV, que llevan más de 10 años de funcionamiento ininterrumpido y no exigen mantenimiento específico, constituyen una prueba excelente de que se pueden hacer seguidores muy fiables. Los seguidores de AESOL son, en buena medida, “hijos” de los que incorpora la central de 1,2 MW de Tudela y, por tanto, un fruto avanzado de un notable esfuerzo tecnológico; y tanto la buena experiencia acumulada hasta hoy como el excelente aspecto que presentan cuando se les examina de cerca, abonan el optimismo respecto a su fiabilidad.

Aunque en esto de la fiabilidad de los seguidores hay que advertir contra los optimismos inmoderados. Siendo cierto que se pueden fabricar muy buenos seguidores, también lo que es que se pueden fabricar otros muy malos. La historia de la fotovoltaica en España incluye algunos episodios francamente lamentables (se dice el pecado, pero no el pecador). Afortunadamente, casi todos son ya cosa del pasado. Su recuerdo sirve aquí para precaverse contra algunos impulsivos, que siempre hay, más capaces de imaginar las maravillas de sus inventos que de responsabilizarse de ellos cuando no funcionan.

### *Rentabilidad energética*

Es una verdad de Perogrullo decir que un ingenio solar debe, a lo largo de su vida útil, producir más energía de la que es necesario invertir en su construcción. La relación entre estas energías, producida e invertida, establece la rentabilidad energética, que es poco analizada, quizás porque no tiene un reflejo directo en los dineros que circulan por los bolsillos de los inversores. Sin embargo, debería serlo más, porque a la larga de ella depende la sensatez de lo que se hace en los sistemas energéticos. Quienes los gestionan deberían estudiar y atender a la rentabilidad energética, antes de decidir si favorecer o no una determinada alternativa.

La rentabilidad energética de los seguidores puede analizarse considerando que, por razones mecánicas, su construcción exige más hierro en la estructura de soporte y más cemento en la zapata de los que exige un generador fotovoltaico estático. Para estimar tal incremento, la tabla 7 compara los datos correspondientes a los seguidores de las huertas solares, que gentilmente me ha proporcionado AESOL, con los correspondientes a otros generadores de las centrales de Toledo (1 MW) y Serre (3 MW), a cuyos datos he podido acceder.

Material	Sistema fotovoltaico			
	SERRE Estático	Toledo Estático	Toledo Seguimiento	Huertas AESOL
Cemento (m <sup>3</sup> /kW)	0,79	0,65	0,91	1,42
Acero (T/kW)	0,21	0,28	0,32	0,27

Tabla 7. Utilización de hierro y cemento en diferentes sistemas fotovoltaicos. Los datos están expresados en m<sup>3</sup> y T, respectivamente, por kW de potencia nominal de generador.

El incremento de material asociado a los seguidores de AESOL se estima en  $0,77 \text{ m}^3/\text{kW}$  (1,42-0,65), que equivale<sup>17</sup> aproximadamente a  $220 \text{ kWh/kW}$  de electricidad<sup>18</sup>. Por otro lado, el contenido energético de los sistemas fotovoltaicos actuales se estima en  $6500 \text{ kWh/kW}$  de electricidad ( $5600 \text{ kWh/kW}$  para los módulos<sup>19</sup> y  $900 \text{ kWh/kW}$  para el resto del sistema). De aquí se puede deducir que estos seguidores incrementan la energía invertida en los sistemas en un 3 %, muy por debajo del 40 % que hemos estimado antes para la ganancia energética en las huertas de Árguedas y Sesma, y también muy por debajo del 35 % que hemos supuesto como representativo de la situación general en España. Por lo tanto, la conclusión es que los seguidores solares son, sin duda alguna, rentables energéticamente.

### *Otras rentabilidades*

Los seguidores solares son una tecnología propia de pequeñas y medianas empresas, que ven en ellos una forma de incrementar el valor que añaden a los sistemas fotovoltaicos, y que está al alcance de sus capacidades técnicas. De hecho, ninguno de los seguidores instalados en España provienen directamente de los grandes fabricantes de las células solares. La mayoría de ellos son producidos directamente en nuestras PYMES, aunque también haya quien se dedica a importarlos.

Los políticos gustan de plagar sus discursos con loas a las PYMES y a su capacidad de creación de empleo. Si están en lo cierto, hay que deducir que los seguidores solares son también rentables socialmente.

### *¿Qué ventajas aportan las huertas solares?*

Con independencia de si utilizan o no seguidores, las huertas solares son una forma de asociación que aporta ventajas a los que la integran. Al igual que las comunidades de vecinos de los bloques de viviendas, la asociación facilita y abarata todo lo relativo a gestión administrativa, mantenimiento, seguros, pagos, cobros, etc. Para su mejor organización, las comunidades de vecinos recurren a un administrador profesional que vela por la legalidad y cumplimiento de los acuerdos; y ese es precisamente el papel de las empresas que promueven las huertas solares. Que, además, intervengan en su ejecución y obtengan de ello el correspondiente beneficio (¡para eso están!), no resta ni un ápice a ese papel gestor que facilita la vida de los huertanos asociados.

Tal papel es particularmente importante aquí. Por experiencia propia, sé que la vida de un productor fotovoltaico individual dista mucho de ser sencilla: Solicitudes, permisos, facturas, contabilidad, declaración de IVA (modelo 300), liquidación de IRPF (modelo 130), IAE... Y todo para una cosa cuya potencia es propia de un electrodoméstico, y cuyo flujo monetario no supera en mucho el de los aguinaldos de Navidad. Así que son bastantes los que, aun deseando invertir en energía solar, se desaniman ante las complejidades de un proceso que les cuesta entender. Sospecho que una cierta complejidad administrativa es inherente a cualquier organi-

---

<sup>17</sup> *Guía de la edificación sostenible*. Calidad energética y medioambiental. Ministerio de Fomento, pág. 45, 1999.

<sup>18</sup>  $0,77 \text{ m}^3/\text{kW} \approx 2,31 \text{ T/kW} \approx 720 \text{ kWh/kW}$  de energía primaria  $\approx 220 \text{ kWh/kW}$  de electricidad.

<sup>19</sup> K.E. Knapp and T.L. Jester, *Energy Balances for Photovoltaic Modules: Status and Prospects*, 28<sup>th</sup> IEEE PVSC, Anchorage, 2000.

zación descentralizada que se empeñe en mantener alta la calidad del servicio que proporciona, así que no soy optimista respecto a que aquella pléyade de trámites llegue a desaparecer algún día, aunque sí pueda clarearse un poco. Por lo mismo, creo que siempre será necesario el papel de los promotores que se encarguen de gestionar las pequeñas inversiones de los individuos, agrupándolos en asociaciones más grandes.

Una razón adicional, particularmente importante, la constituye el hecho de que la mayoría de los españoles, por eso de que viven en bloques de pisos, no disponen en sus domicilios del espacio necesario para instalar un sistema fotovoltaico. Para invertir en energía solar deben recurrir a comprar terreno en otro lugar. Y lo que esta compra comporta de complejidad hace del todo impensable que cada uno se apañe por su lado. Los promotores y las huertas solares son la mejor posibilidad que se me ocurre para que esa mayoría de la población pueda participar de las oportunidades del plan fotovoltaico establecido por el RD 2818. Oponerse a ello y favorecer exclusivamente la implantación de sistemas estrictamente individuales es tanto como oponerse a la construcción de bloques de pisos y favorecer sólo la de chalés individuales (ni siquiera adosados). Y esto de que las oportunidades deban de ser para todos no es ocurrencia propia; está en la Constitución: *“Corresponde a los poderes públicos promover las condiciones... y facilitar la participación de todos los ciudadanos en la vida política, económica, cultural y social”* (Artículo 9.2), de la que en 2003 celebramos el 25 aniversario.

Entender el papel de los promotores y aprender a regularlo es una de las lecciones más interesantes que podrían aprenderse en el contexto del RD 2818. Este plan resulta casi irrelevante en términos energéticos (cuando se alcancen los 50 MW previstos, la electricidad fotovoltaica no representará más que el 0,03 % del consumo eléctrico español), y también es irrelevante en términos económicos (el total de las primas a la electricidad fotovoltaica será, en ese momento inferior a 22 millones de euros al año; unas veinte veces menos de la anualidad actual de la moratoria nuclear). La principal utilidad del plan estriba en la posibilidad que representa de aprender como se integra una alternativa verdaderamente descentralizada en el sistema eléctrico actual. En este sentido, oponerse a las huertas solares es tanto como cerrar las puertas al aprendizaje y, otra vez, sentarse en la butaca del “¡Que inventen ellos!, que yo ya copiaré cuando llegue el caso”.

Esta postura es, en general, poco inteligente, y totalmente desacorde con el peso relativo de la industria fotovoltaica española en el contexto internacional. En nuestro país se fabrica el 8 % del total de las células solares que se producen en el mundo. En flagrante contraste, sólo se instalan el 0,8 %. Este desequilibrio, que lamentablemente también es una peculiaridad española, indica que la apuesta de la administración por explotar la ventaja relativa con la que cuenta España en este sector es pacata y poco decidida. Y es lástima porque sí, y también porque, bien mirado, no tenemos tantas boletas del juego como para permitirnos rechazar una tan evidente como ésta.

## **Conclusiones**

Los seguidores solares son ingenios sensatos en el marco de la conexión a la red de sistemas fotovoltaicos. A condición de estar bien hechos, pueden ser muy fiables, y mejorar los rendimientos energético y económico de los sistemas. Además, permiten distribuir la componente tecnológica, incrementando el valor añadido por las PYMES.

Las huertas solares son una buena idea. Representan una puerta de acceso –la única, por el momento– a la generación de electricidad solar para las inversiones individuales muy pequeñas, precisamente las que están al alcance de la mayoría de la población. En este sentido, es lícito afirmar que las huertas solares representan una vía real hacia la democratización del sistema energético.

Las huertas solares son objeto en la actualidad de duras reticencias por parte de algunos organismos de la Administración. Como argumentos en contra, se esgrimen interpretaciones parciales de las normas legales que regulan hoy día la conexión de sistemas fotovoltaicos a la red eléctrica. Sin embargo, otras interpretaciones son posibles, como lo demuestra el hecho de la existencia de huertas solares en Navarra. La opción por una u otra interpretación refleja la postura real ante los cambios que representan de verdad las energías renovables. Los hay que están en contra, simplemente, porque son refractarios a los cambios. Como quiera que todos queremos conservar aquello con lo que nos sentimos a gusto, esta postura es humanamente comprensible y, como tal, no merece diatribas en contra. Ahora bien, en la medida en la que representa un freno a la penetración de las energías renovables en el sector eléctrico, tal postura merece contestación. Aportar argumentos serenos a favor de esta contestación, y mostrar apoyo público a quienes empujan enconadamente del carro de las huertas solares, han sido los motivos principales de escribir este artículo.

### **Agradecimiento**

Miguel Alonso Abella revisó y aportó datos y comentarios de gran utilidad.



## ANEXO

### *Cálculos de las ganancias proporcionadas por varios tipos de seguimiento*

Para los cálculos se han utilizado como datos de entrada los diferentes años típicos de diferentes fuentes de información.

En las tablas 1-A a 4-A, se indican los valores medios anuales de la irradiación diaria sobre una superficie horizontal,  $G_{da}(0)$ , sobre una que sigue al Sol en dos ejes,  $2x$ , en un eje polar,  $I_{xp}$ , en un eje azimutal,  $I_{xa}$ , en un eje horizontal,  $I_{xh}$  y sobre una superficie estática e inclinada un ángulo óptimo. Estos datos están expresados en Wh/m<sup>2</sup>.

En las tablas 5-A a 7-A se indican los valores medios anuales de la energía diaria, DC o AC, generada por sistemas fotovoltaicos asociados a las posibilidades de seguimiento anteriores. Estos datos están expresados en kWh/kW de potencia nominal de generador.

También se indican los valores del índice de claridad anual y de las ganancias de cada seguimiento con respecto a la superficie estática. Estos valores son adimensionales.

Se ha supuesto un coeficiente de albedo de 0,2.

Las tablas 1-A a 6-A están calculadas con datos contenidos en diferentes fuentes de información para Madrid.

	<b>Censolar</b>	<b>IES</b>	<b>CE-H</b>	<b>INM</b>	<b>CE-Atl.</b>	<b>U. Val.</b>	<b>Meteon.</b>	<b>NASA</b>
$G_{da}(0)$	4287	4537	4605	4744	4364	4406	4556	4231
$K_{Ta}$	0,554	0,586	0,595	0,631	0,564	0,569	0,589	0,547
$2x$	6949	7539	7755	8104	7092	7255	7583	6815
$I_{xp}$	6735	7298	7503	7833	6876	7022	7339	6609
$I_{xa}$	6494	7016	7200	7505	6627	6760	7055	6376
$I_{xh}$	6139	6648	6806	7096	6286	6382	6687	6025
$est$	4945	5259	5388	5577	5013	5117	5282	4875
$2x/est$	<b>1,405</b>	<b>1,433</b>	<b>1,439</b>	<b>1,453</b>	<b>1,415</b>	<b>1,418</b>	<b>1,436</b>	<b>1,389</b>
$I_{xp}/est$	<b>1,362</b>	<b>1,388</b>	<b>1,393</b>	<b>1,404</b>	<b>1,371</b>	<b>1,372</b>	<b>1,390</b>	<b>1,356</b>
$I_{xa}/est$	<b>1,313</b>	<b>1,334</b>	<b>1,336</b>	<b>1,346</b>	<b>1,322</b>	<b>1,321</b>	<b>1,336</b>	<b>1,308</b>
$I_{xh}/est$	<b>1,241</b>	<b>1,264</b>	<b>1,263</b>	<b>1,272</b>	<b>1,254</b>	<b>1,247</b>	<b>1,266</b>	<b>1,236</b>

Tabla 1-A. Ganancias que proporciona el seguimiento, en términos de la radiación solar incidente sobre los receptores.

	<b>Censolar</b>	<b>IES</b>	<b>CE-H</b>	<b>INM</b>	<b>CE-Atl.</b>	<b>U. Val.</b>	<b>Meteon.</b>	<b>NASA</b>
$G_{da}(0)$	4287	4537	4605	4744	4364	4406	4556	4231
$K_{Ta}$	0,554	0,586	0,595	0,631	0,564	0,569	0,589	0,547
$2x$	6741	7323	7536	7880	6882	7042	7367	6608
$l_{xp}$	6520	7075	7276	7602	6659	6802	7116	6396
$l_{xa}$	6268	6782	6962	7262	6399	6529	6820	6153
$l_{xh}$	5901	6402	6554	6837	6047	6137	6439	5789
$est$	4657	4957	5081	5262	4721	4822	4978	4951
$2x/est$	<b>1,447</b>	<b>1,477</b>	<b>1,483</b>	<b>1,498</b>	<b>1,458</b>	<b>1,460</b>	<b>1,480</b>	<b>1,440</b>
$l_{xp}/est$	<b>1,400</b>	<b>1,427</b>	<b>1,432</b>	<b>1,445</b>	<b>1,410</b>	<b>1,411</b>	<b>1,430</b>	<b>1,393</b>
$l_{xa}/est$	<b>1,346</b>	<b>1,368</b>	<b>1,370</b>	<b>1,380</b>	<b>1,355</b>	<b>1,354</b>	<b>1,370</b>	<b>1,340</b>
$l_{xh}/est$	<b>1,267</b>	<b>1,292</b>	<b>1,290</b>	<b>1,299</b>	<b>1,281</b>	<b>1,273</b>	<b>1,293</b>	<b>1,261</b>

Tabla 2-A. Ganancias que proporciona el seguimiento, en términos de la radiación solar que efectivamente alcanza a las células solares, cuando las superficies receptoras tienen un nivel de suciedad bajo, definido por una transmitancia a incidencia normal,  $T_n = 0,98$ .

	<b>Censolar</b>	<b>IES</b>	<b>CE-H</b>	<b>INM</b>	<b>CE-Atl.</b>	<b>U. Val.</b>	<b>Meteon.</b>	<b>NASA</b>
$G_{da}(0)$	4287	4537	4605	4744	4364	4406	4556	4231
$K_{Ta}$	0,554	0,586	0,595	0,631	0,564	0,569	0,589	0,547
$2x$	6666	7243	7454	7795	6806	6964	7278	6535
$l_{xp}$	6447	6995	7195	7518	6584	6725	7036	6324
$l_{xa}$	6195	6703	6881	7178	6324	6453	6741	6080
$l_{xh}$	5829	6324	3474	6755	5973	6062	6361	5718
$est$	4593	4888	5011	5190	4656	4755	4909	4527
$2x/est$	<b>1,452</b>	<b>1,482</b>	<b>1,488</b>	<b>1,502</b>	<b>1,462</b>	<b>1,465</b>	<b>1,484</b>	<b>1,444</b>
$l_{xp}/est$	<b>1,404</b>	<b>1,431</b>	<b>1,436</b>	<b>1,449</b>	<b>1,414</b>	<b>1,414</b>	<b>1,433</b>	<b>1,397</b>
$l_{xa}/est$	<b>1,349</b>	<b>1,371</b>	<b>1,373</b>	<b>1,383</b>	<b>1,358</b>	<b>1,357</b>	<b>1,373</b>	<b>1,343</b>
$l_{xh}/est$	<b>1,269</b>	<b>1,294</b>	<b>1,292</b>	<b>1,301</b>	<b>1,283</b>	<b>1,275</b>	<b>1,296</b>	<b>1,263</b>

Tabla 3-A, Ganancias que proporciona el seguimiento, en términos de la radiación solar que efectivamente alcanza a las células solares, cuando las superficies receptoras tienen un nivel de suciedad moderado, definido por una transmitancia a incidencia normal,  $T_n = 0,97$ .

	<b>Censolar</b>	<b>IES</b>	<b>CE-H</b>	<b>INM</b>	<b>CE-Atl.</b>	<b>U. Val.</b>	<b>Meteon.</b>	<b>NASA</b>
$G_{da}(0)$	4287	4537	4605	4744	4364	4406	4556	4231
$K_{Ta}$	0,554	0,586	0,595	0,631	0,564	0,569	0,589	0,547
$2x$	6365	6920	7122	7450	6500	6652	6962	6239
$l_{xp}$	6141	6668	6859	7196	6273	6408	6707	6024
$l_{xa}$	5886	6372	6542	6826	6011	6132	6409	5777
$l_{xh}$	5520	5993	6135	6402	5660	5742	6028	5414
$est$	4310	4580	4704	7872	4370	4463	4608	4248
$2x/est$	<b>1,477</b>	<b>1,508</b>	<b>1,514</b>	<b>1,529</b>	<b>1,488</b>	<b>1,490</b>	<b>1,511</b>	<b>1,469</b>
$l_{xp}/est$	<b>1,425</b>	<b>1,453</b>	<b>1,458</b>	<b>1,471</b>	<b>1,436</b>	<b>1,436</b>	<b>1,456</b>	<b>1,418</b>
$l_{xa}/est$	<b>1,366</b>	<b>1,389</b>	<b>1,391</b>	<b>1,401</b>	<b>1,376</b>	<b>1,374</b>	<b>1,391</b>	<b>1,360</b>
$l_{xh}/est$	<b>1,282</b>	<b>1,309</b>	<b>1,304</b>	<b>1,314</b>	<b>1,295</b>	<b>1,287</b>	<b>1,308</b>	<b>1,274</b>

Tabla 4-A. Ganancias que proporciona el seguimiento, en términos de la radiación solar que efectivamente alcanza a las células solares, cuando las superficies receptoras tienen un nivel de suciedad elevado, definido por una transmitancia a incidencia normal,  $T_n = 0,93$ .

	<b>Censolar</b>	<b>IES</b>	<b>CE-H</b>	<b>INM</b>	<b>CE-Atl.</b>	<b>U. Val.</b>	<b>Meteon.</b>	<b>NASA</b>
$G_{da}(0)$	4287	4537	4605	4744	4364	4406	4556	4231
$K_{Ta}$	0,554	0,586	0,595	0,631	0,564	0,569	0,589	0,547
$2x$	6,168	6,665	6,855	7,142	6,285	6,436	6,705	6,053
$l_{xp}$	5,967	6,441	6,622	6,894	6,082	6,218	6,478	5,859
$l_{xa}$	5,712	6,150	6,310	6,560	5,821	5,943	6,184	5,612
$l_{xh}$	5,373	5,802	5,940	6,176	5,496	5,583	5,836	5,276
$est$	4,208	4,458	4,568	4,718	4,257	4,352	4,477	4,150
$2x/est$	<b>1,466</b>	<b>1,495</b>	<b>1,501</b>	<b>1,514</b>	<b>1,467</b>	<b>1,479</b>	<b>1,498</b>	<b>1,458</b>
$l_{xp}/est$	<b>1,418</b>	<b>1,445</b>	<b>1,450</b>	<b>1,461</b>	<b>1,429</b>	<b>1,429</b>	<b>1,447</b>	<b>1,412</b>
$l_{xa}/est$	<b>1,358</b>	<b>1,380</b>	<b>1,381</b>	<b>1,391</b>	<b>1,367</b>	<b>1,366</b>	<b>1,381</b>	<b>1,352</b>
$l_{xh}/est$	<b>1,277</b>	<b>1,302</b>	<b>1,300</b>	<b>1,309</b>	<b>1,291</b>	<b>1,283</b>	<b>1,303</b>	<b>1,271</b>

Tabla 5-A. Ganancias que proporciona el seguimiento, en términos de la energía DC que entregan los generadores fotovoltaicos, suponiendo que sus superficies están bastante sucias. Las cifras de producción ( $2x$ ,  $l_{xp}$ ,  $l_{xa}$ ,  $l_{xh}$  y  $est$ ) vienen dadas en kWh/kW, y representan valores medios anuales de la productividad diaria por unidad de potencia nominal de generador. Los valores máximos y mínimos considerados para la temperatura ambiente a lo largo del día representativo de cada mes son:

$T_{MAX}$  (°C): 6,9, 7,4, 12,6, 15,4, 19,4, 24,6, 26,1, 28,0, 21,0, 13,7, 9,5 y 9,1.

$T_{MIN}$  (°C): 0,7, 1,0, 3,6, 5,4, 9,1, 12,7, 13,0, 14,6, 11,2, 7,0, 3,3, y 3,2.

	<b>Censolar</b>	<b>IES</b>	<b>CE-H</b>	<b>INM</b>	<b>CE-Atl.</b>	<b>U. Val.</b>	<b>Meteon.</b>	<b>NASA</b>
$G_{da}(0)$	4287	4537	4605	4744	4364	4406	4556	4231
$K_{Ta}$	0,554	0,586	0,595	0,631	0,564	0,569	0,589	0,547
$2x$	5,560	6,002	6,171	6,425	5,663	5,801	6,037	5,456
$l_{xp}$	5,380	5,804	5,965	6,206	5,482	5,607	5,836	5,283
$l_{xa}$	5,121	5,516	5,677	5,878	5,222	5,352	5,523	4,988
$l_{xh}$	4,843	5,227	5,353	5,563	4,952	5,034	5,258	4,755
$est$	3,605	3,826	3,927	4,092	3,638	3,724	3,856	3,55
$2x/est$	<b>1,542</b>	<b>1,569</b>	<b>1,571</b>	<b>1,570</b>	<b>1,557</b>	<b>1,552</b>	<b>1,566</b>	<b>1,535</b>
$l_{xp}/est$	<b>1,493</b>	<b>1,517</b>	<b>1,519</b>	<b>1,517</b>	<b>1,507</b>	<b>1,500</b>	<b>1,514</b>	<b>1,486</b>
$l_{xa}/est$	<b>1,421</b>	<b>1,442</b>	<b>1,442</b>	<b>1,437</b>	<b>1,435</b>	<b>1,432</b>	<b>1,432</b>	<b>1,403</b>
$l_{xh}/est$	<b>1,343</b>	<b>1,366</b>	<b>1,363</b>	<b>1,359</b>	<b>1,361</b>	<b>1,352</b>	<b>1,363</b>	<b>1,339</b>

Tabla 6-A. Ganancias que proporciona el seguimiento, en términos de la electricidad efectivamente inyectada en la red, El caso supuesto y las unidades son lo mismo que en la tabla anterior. Las pérdidas del inversor se han modelado como la suma de tres términos:  $k_0 + k_1 p_o + k_2 p_o^2$ , donde  $p_o$  representa la relación entre la potencia de trabajo y la potencia nominal, y  $k_0$ ,  $k_1$  y  $k_2$  son tres parámetros característicos del inversor. Aquí se han utilizado:  $k_0 = 0,02$ ;  $k_1 = 0,025$ ;  $k_2 = 0,08$ .

<b>Lugar</b>	$G_a(0)$	$2x$	$l_{xp}$	$l_{xa}$	$l_{xh}$	$est$	$2x/est$	$l_{xp}/est$	$l_{xa}/est$	$l_{xh}/est$
Alicante	4655	6199	5984	5651	5371	4006	<b>1,547</b>	<b>1,493</b>	<b>1,410</b>	<b>1,341</b>
Almería	4706	6079	5872	5535	5319	3976	<b>1,529</b>	<b>1,477</b>	<b>1,392</b>	<b>1,338</b>
Asturias	3022	3521	3422	3279	2944	2570	<b>1,370</b>	<b>1,331</b>	<b>1,276</b>	<b>1,145</b>
Barcelona	3756	4770	4619	4397	4062	3194	<b>1,493</b>	<b>1,446</b>	<b>1,376</b>	<b>1,272</b>
Huelva	4890	6381	6170	5797	5641	4052	<b>1,575</b>	<b>1,522</b>	<b>1,431</b>	<b>1,392</b>
Jaén	4416	5532	5359	5026	4917	3599	<b>1,537</b>	<b>1,489</b>	<b>1,396</b>	<b>1,366</b>
Las Palmas	4891	5783	5594	5019	5280	3874	<b>1,493</b>	<b>1,444</b>	<b>1,295</b>	<b>1,363</b>
Lugo	3488	4242	4121	3955	3653	2913	<b>1,456</b>	<b>1,414</b>	<b>1,357</b>	<b>1,254</b>
Madrid	4287	5560	5380	5121	4843	3605	<b>1,542</b>	<b>1,493</b>	<b>1,421</b>	<b>1,343</b>
Zamora	4030	5085	4935	4738	4454	3341	<b>1,522</b>	<b>1,477</b>	<b>1,418</b>	<b>1,333</b>
Nav-Cen.	3499	4254	4136	3989	3674	2919	<b>1,457</b>	<b>1,417</b>	<b>1,367</b>	<b>1,259</b>
Nav-Nasa	3794	4796	4650	4413	4128	3182	<b>1,507</b>	<b>1,461</b>	<b>1,387</b>	<b>1,297</b>
Nav-MdC	4603	6333	6124	5853	5442	4005	<b>1,581</b>	<b>1,529</b>	<b>1,461</b>	<b>1,359</b>

Tabla 7-A. Ganancias que proporciona el seguimiento, en términos de la electricidad efectivamente inyectada en la red, en diferentes lugares de la geografía española. El caso supuesto y las unidades son lo mismo que en la tabla anterior. Los datos de latitud e índice de claridad de cada lugar se pueden consultar en la tabla 6 del texto.

- 
- <sup>i</sup> CENSOLAR, *Mean Values of Solar Irradiation on Horizontal Surface (International H-World Database)*, Progensa, Sevilla, Spain, 1993.
- <sup>ii</sup> M.H. Macagnan, E. Lorenzo and C. Jimenez, *Solar Radiation in Madrid*. Int. J. Solar Energy, vol 16, 1-14, 1994.
- <sup>iii</sup> B. Bourges, Commission of the European Communities, *Climatic Data Handbook for Europe*, De. Kluwer, Academic Publishers, The Netherlands, 1992.
- <sup>iv</sup> Y. Font Tullot, *Atlas de la Radiación Solar en España*, Ed. INM, Ministerio de Transportes, Turismo y Comunicaciones, Spain, 1984.
- <sup>v</sup> W. Palz, J. Greif, Commission of the European Communities, *European Solar Radiation Atlas*, De. Springer, Germany, 1996.
- <sup>vi</sup> M.A. Herrero, *Soleamiento y Energía Solar*, De. Servicio Publicaciones Universidad de Valencia, Spain, 1985
- <sup>vii</sup> *Meteonorm, version 4.0.*
- <sup>viii</sup> NASA, *Surface Meteorology and Solar Energy Data Set.*