

# Potencial de la energía solar fotovoltaica y termosolar integrada en edificios de viviendas en la Comunidad de Madrid

Marta Victoria (Observatorio Crítico de la Energía)

El objetivo principal de este trabajo consiste en estimar, utilizando datos actualizados y disponibles públicamente, cuál es el potencial de generación de electricidad mediante energía solar fotovoltaica (FV) instalada en edificios de viviendas en la Comunidad Autónoma de Madrid. Comparando este potencial estimado con el consumo eléctrico, tanto a nivel doméstico como total, que se da en toda la región se pretende valorar cuál puede ser la aportación real de la energía FV al cambio de modelo de generación de energía eléctrica en Madrid. Se estima también cual sería el coste de la instalación fotovoltaica y se muestra que el periodo de retorno económico es inferior a la vida útil de los paneles fotovoltaicos. Además, también se analiza el problema del reparto de superficie de tejado entre las dos tecnologías que pueden instalarse en él: fotovoltaica y paneles termosolares para calentar agua demostrándose que existe tejado suficiente para desarrollar el potencial que presentan ambas tecnologías.

## Estimación del potencial de generación de energía FV

El método que se ha utilizado para el cálculo de la potencia FV que se puede instalar en edificios de la Comunidad de Madrid, descrito a continuación, es muy similar al expuesto en [1]. Consiste en asumir un edificio tipo de planta cuadrada cuyos valores característicos estén basados en la media de todos los edificios existentes en la Comunidad de Madrid

y utilizar entonces este edificio tipo para estimar la cantidad de paneles FV que se podrían integrar en él. Utilizando el Censo de Población y Viviendas de 2001 [2] y las estadísticas de vivienda de la Comunidad de Madrid [6], se obtienen para toda la comunidad, el número de edificios de viviendas ( $E$ ), el número de pisos en cada edificio en valor medio ( $P$ ), el número de viviendas por edificio en valor medio ( $V$ ) y el tamaño medio de superficie en  $m^2$  de vivienda ( $S$ ). Todos estos valores se recogen en la tabla 1. Dividiendo el número de viviendas por edificio ( $V$ ) entre el número de pisos por edificio ( $P$ ) obtenemos el número de viviendas por piso ( $V_p$ ) y multiplicando este valor por la superficie media por vivienda ( $S$ ) obtenemos la superficie media por piso, es decir, la superficie media de tejado que tiene el edificio tipo ( $ST$ ).

$$ST = \frac{V}{P} \cdot S \quad (1)$$

Sin embargo, no todo el tejado de los edificios puede ser ocupado por paneles fotovoltaicos, existen elementos constructivos como chimeneas, antenas, sistemas de calefacción y aire acondicionado, así como las sombras proyectadas por ellos y por otros edificios cercanos que inutilizarán parte de la superficie de tejado. Si suponemos que sólo el 50 % de la superficie de tejado puede ser utilizada para colocar paneles y multiplicando la superficie de tejado ( $ST$ ) del edificio tipo por el número de edificios de Madrid obtenemos que existen en dicha comunidad aproximadamente 61,5 km<sup>2</sup> de tejado donde pue-

de ser instalados paneles FV. Los datos relativos al número de viviendas han sido obtenidos a partir del censo realizado en 2008 [6].

$$S_{FV} = 0,5 \cdot ST \cdot E = 61,5 \text{ km}^2 \quad (2)$$

La superficie disponible en las fachadas de los edificios para la integración FV es mucho menor que la disponible en tejados (ya que no todos las fachadas estarán bien orientadas y existen multitud de elementos constructivos como ventanas, cañerías, etc.) y es por lo tanto despreciada en este cálculo de grandes números. Siendo esta una aproximación conservativa pues la posibilidad de instalar FV en las fachadas no hará sino aumentar el potencial calculado en este trabajo.

Existen varias tecnologías de panel fotovoltaico adecuadas para instalar en edificios: silicio mono o policristalino, lámina delgada de silicio amorfo, Cd-Te, CIGS, etc. por lo que resulta difícil definir un valor de eficiencia de conversión eléctrica que sea representativo de todas ellas simultáneamente. En este trabajo se ha considerado una eficiencia de módulo ( $\eta_{panel}$ ) del 15 % que es representativa del silicio mono o policristalino, material del que están fabricadas la gran mayoría de paneles instalados en España en los últimos años [3]. Además se considera que el rendimiento general de la instalación, lo que se conoce como Performance Ratio (PR) e incluye numerosas pérdidas (cableado, temperatura, paso a corriente alterna, etc.), es del 80 % siendo éste un valor típicamente adoptado en estos cálculos.

Por último, los valores de radiación solar en la Comunidad de Madrid han sido obtenidos de la base de datos PVGIS [4]. El número de horas equivalentes, es decir, el número de horas en las que un panel instalado horizontalmente funcionando a su potencia nominal generaría tanta energía como genera realmente a lo largo de un año, es estimado por dicha base de datos en 1.638 horas.

Con todos los datos anteriores la energía generada a lo largo de un año por los paneles FV que cubrirían toda la superficie disponible en los tejados de edificios de la Comunidad de Madrid sería de 10.301 GWh. Si comparamos este resultado con el consumo eléctrico total y doméstico de la comunidad en el año 2009 [5] obtenemos que la energía solar FV instalada en edificios podría satisfacer el 39 % de la demanda eléctrica de la Comunidad de Madrid y el 120 % de la demanda eléctrica doméstica.

$$Energia_{FV} = \rho_{FV} \cdot PR \cdot S_{FV} \cdot H_{equiv} = 10.301 \text{ GWh/año}$$

donde la densidad fotovoltaica  $\rho_{FV}$  representa la potencia fotovoltaica que puede instalarse por unidad de superficie y puede ser calculada como  $\rho_{FV} = \eta_{panel} \cdot 1000 \text{ W/m}^2$ . Es necesario mencionar también que serán necesarias otras fuentes de energía o utilizar acumulación para acoplar la curva de generación y demanda en cada momento. Es decir, la generación FV no podrá satisfacer la demanda eléctrica en los hogares durante la noche. Sin embargo al tratarse de instalaciones conectadas a la red es factible realizar este acople de oferta y demanda. Por ejemplo los huecos de generación FV pueden rellenarse con energía eólica ya que sus patrones de producción son bastante complementarios. Cabe destacar que esta generación FV será muy útil para satisfacer el pico de demanda diurno (causado principalmente por los aparatos de refrigeración en verano) ya que su pico de generación se produce prácticamente a las mismas horas. Con la salvedad de la necesidad de sistemas para acoplar generación y demanda, lo que sí ponen de manifiesto estos resultados son el enorme potencial de la FV integrada en edificios en Madrid para generar un gran porcentaje del consumo eléctrico de manera sostenible.

Por último es importante destacar también el hecho de que la superficie de tejado pueda resultar útil para instalar paneles térmicos que reduzcan el consumo energético de la vivienda (en agua caliente, calefacción, etc.). Es posible que lo más sensato sea compartir la superficie de tejado doméstico entre paneles fotovoltaicos y térmicos, este aspecto se analiza más adelante.

## Estimación del coste de generación de energía FV integrada en edificios en la Comunidad de Madrid

Previamente a proponer cuáles serían las medidas políticas que deberían realizarse para posibilitar y propulsar este cambio resulta interesante realizar una estimación del coste asociado a la instalación de paneles FV en edificios. En primer lugar podemos calcular cuál es el periodo de retorno de una instalación FV, es decir, cuantos años se tarda en recuperar

Parámetros utilizados en la estimación	Valor	Referencia
Número de edificios de viviendas, E	597.413	[6]
Número de pisos por edificio en valor medio, P	2,58	[2]
Número de viviendas por edificio en valor medio, V	4,84	[2]
Superficie por vivienda en valor medio, S (en $m^2$ )	110,00	[2]
Número de viviendas por piso en valor medio, $V_p$	1,87	cálculo propio
Superficie media de tejado, ST (en $m^2$ )	205,96	cálculo propio
Factor de utilización de tejados	50 %	estimación propia
Superficie disponible para panel FV (en $km^2$ )	61,5	cálculo propio
Eficiencia media panel FV ( $\rho_{FV}$ )	15 %	[3]
Performance Ratio de la instalación (PR)	80 %	estimación propia
Horas equivalentes de luz en Madrid ( $H_{equiv}$ )	1.638	[4]
Energía FV generada anualmente (en GWh)	10.301	cálculo propio
Demanda eléctrica en la C.A. Madrid en 2009 (en GWh)	30.650	[5]
Demanda eléctrica doméstica en la C.A. Madrid en 2009 (en GWh)	10.106	[5]

Tabla 1: Parámetros utilizados en la estimación del potencial FV

la inversión inicial. Los datos utilizados para la estimación se recogen en la tabla 2. Para el cálculo se ha considerado que los gastos de la inversión se realizan todos en el primer año y son de 4.000 euros por  $kW_p$  instalado, estos gastos incluyen tanto el precio del panel fotovoltaico como el del resto de la instalación, estructura, cableado, inversores, etc. Los beneficios serán, para cada año, el ahorro en la factura de electricidad que supongan los  $kWh$  generados por los paneles (resultado de multiplicar la potencia instalada por las horas de sol equivalentes en Madrid). Además, se ha considerado que el precio de la electricidad aumentará un 1 % anualmente, siendo esta una hipótesis conservadora ya que es previsible que el precio de la electricidad aumente como mínimo esa cantidad. Con estas consideraciones, el período de retorno resulta ser 21 años<sup>1</sup>, es decir, desde el punto de vista económico al consumidor le da igual instalar paneles FV y utilizar la energía generada por ellos que pagar la factura de electricidad equivalente durante 21 años. La diferencia, claro está, reside en el hecho de que con la instalación fotovoltaica el consumidor deberá pagar las facturas de 21 años por adelantado. Es aquí donde las medidas políticas adecuadas pueden decantar la balanza hacia la instalación masiva de energía FV en edificios. Estas medidas políticas podrían estar basadas en la cofinanciación de las instalaciones o en una legislación que obligara a la instalación de una determinada potencia fotovoltaica en los edificios de nueva construcción o en aquellos sometidos a un proceso de rehabilitación. También resulta importante destacar

<sup>1</sup>Este cálculo no tiene en cuenta las actuales subvenciones a la energía FV, en caso de considerarse el tiempo de retorno energético sería de entre 10 y 15 años

Parámetros utilizados en la estimación	Valor
Coste $kW$ instalado (panel + BOS) (€)	4.000
Precio (año 2010) $kWh$ eléctrico (€)	0.1615
Incremento anual precio electricidad	1 %
Interés del dinero	6 %
Período de Retorno	21 años

Tabla 2: Parámetros utilizados en la estimación económica

que la vida útil estimada de los paneles es mayor que 21 años. De hecho, los fabricantes garantizan que a los 20 años la potencia de un panel será mayor del 80 % de la potencia inicial pero su vida útil puede alargarse hasta los 30 o 40 años. Como consecuencia, a partir del año 22 la instalación de paneles FV resultaría una inversión que comenzaría a aportar importantes beneficios.

## Termosolar instalada en edificios

Existe otra aplicación muy interesante que permite un ahorro considerable del consumo de energía doméstico y que utiliza la superficie disponible en los tejados de los edificios: los paneles termosolares tanto para agua caliente sanitaria (ACS) como para calefacción. La pregunta que surge a continuación es si los edificios de la Comunidad de Madrid cuentan con tejado suficiente para desarrollar las dos tecnologías: fotovoltaica y termosolar y en ese caso cuál será la mejor forma de repartir la superficie disponible entre ambas.

Para ello se ha realizado un breve análisis sobre la tecnología termosolar para calentar agua cuyas hipótesis principales se recogen en la tabla 3. Teniendo en cuenta las necesidades de agua mensuales, la cantidad de energía que es necesario aportar para calentarla (que variará en función del mes y de la temperatura ambiente) y la radiación solar que llegará a los paneles (también variable en función del mes), se puede diseñar un sistema termosolar tipo cuya generación de energía variará en función del tamaño de los módulos utilizados, es decir, de la superficie de tejado empleada para instalar termosolar. Si la superficie de paneles termosolares es muy pequeña será necesario un aporte extra de energía para calentar agua (esto ocurrirá sobretudo en los meses de invierno). A medida que aumenta la superficie, la instalación termosolar será capaz de calentar agua durante un mayor número de meses pero llegará un momento en que dicha instalación estará sobredimensionada y no resultará muy eficiente (ya que en este caso sería mejor utilizar esa superficie extra de tejado para instalar fotovoltaica).

La cuestión de cómo repartir la superficie de tejado disponible entre las dos tecnologías puede responderse utilizando las figuras 1 y 2. En la primera se muestra la energía térmica generada mediante paneles termosolares y la energía eléctrica de origen fotovoltaico en función de la cantidad de superficie útil de tejado destinada a cada una de las dos tecnologías. Aunque se trate de tipos de energía diferentes (térmica y eléctrica) pueden sumarse para calcular la cantidad total de energía renovable generada en los tejados de Madrid en función del reparto de superficie entre ambas tecnologías. La curva que muestra el total de energía renovable generada en los tejados de Madrid alcanza el máximo cuando 20  $km^2$  de tejado son destinados a termosolar y el resto a fotovoltaica. Para una superficie destinada a termosolar entre 10 y 25  $km^2$  el máximo permanece prácticamente constante, por lo que hemos decidido considerar la distribución óptima aquella en la que se utilizan 10  $km^2$  para termosolar y el resto para fotovoltaica. Esta decisión está basada en el hecho de que la estimación se ha realizado para edificios tipo pero en la realidad algunos edificios serán mayores y el transporte de agua caliente de unos a otros no será muy eficiente (al contrario que la electricidad fotovoltaica en la que el lugar exacto en la que se genere no tiene ninguna implicación). Como se comprueba más adelante, con este reparto de superficie de tejado (10  $km^2$  para termosolar y 52  $km^2$  para fotovoltaica) se podrá abastecer prácticamente la totalidad del consumo eléctrico doméstico y un por-

Parámetro utilizado en la estimación	Valor
Consumo de ACS (litros/persona día)	50
Temperatura ACS (°C)	45
Nº medio de personas por edificio	13.9
Consumo doméstico para ACS (kWh)	2.684
<b>Diseño óptimo</b>	
Superficie de panel termosolar por persona ( $m^2$ )	1.25
Superficie de panel termosolar por edificio ( $m^2$ )	17.4
Energía anual ahorrada con el panel termosolar ( $Kwh$ )	1998
Porcentaje de la energía para ACS de origen solar	74 %

Tabla 3: Parámetros utilizados en el análisis de la tecnología termosolar y resultados del diseño óptimo

centaje muy importante del consumo doméstico de agua caliente. Este diseño óptimo, supone también que se instalarán sistemas termosolares suficientes para abastecer las necesidades de agua caliente sin un excesivo sobredimensionado de los sistemas termosolares lo que redundará en una disminución de su coste. Los resultados de este diseño termosolar optimizado también se recogen en la tabla 3 y figura 3 y suponen una instalación termosolar de aproximadamente 17  $m^2$  por edificio. Con este diseño óptimo los paneles serán capaces de cubrir toda la energía necesaria entre Abril y Septiembre mientras que en el resto del año el sistema requerirá de un aporte extra de energía.

Al igual que ocurre con la fotovoltaica, el periodo de retorno de la inversión es inferior a su vida útil. El número de años necesarios para recuperar la inversión varía entre 5 y 6 años si la termosolar ha sustituido calefacción eléctrica y entre 11 y 12 años si ha sustituido calefacción que utilizaba gas [7].

Con el reparto optimizado del tejado disponible se obtienen simultáneamente los siguientes resultados (figura 2). En primer lugar, la tecnología termosolar es capaz de generar el 74 % de la energía necesaria para ACS en toda la Comunidad de Madrid. En segundo lugar, el potencial de la energía fotovoltaica integrada en edificios disminuye pero continúa siendo tremendamente importante alcanzando el 99 % del consumo eléctrico doméstico y un 33 % del consumo eléctrico total en la Comunidad de Madrid. En otras palabras, existe suficiente tejado en los edificios de Madrid para que “quepan” ambas tecnologías. Estos cálculos estimativos, aunque sujetos por supuesto a un cierto error, son válidos en tanto

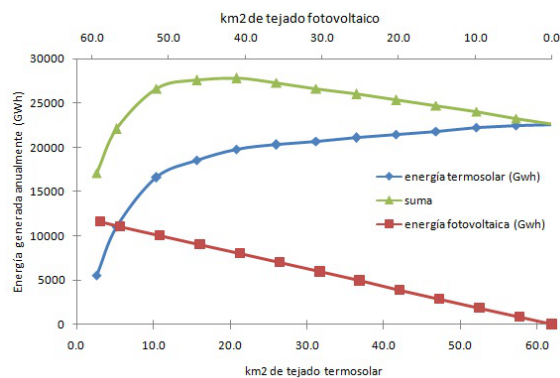


Figura 1: Energía anual generada mediante paneles termosolares y fotovoltaicos en función del reparto de superficie de tejado útil en toda la Comunidad de Madrid

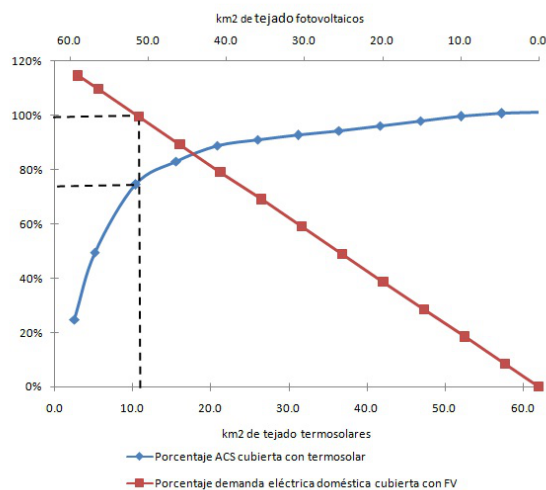


Figura 2: Porcentaje de energía para ACS cubierta con paneles termosolares y porcentaje de demanda eléctrica doméstica cubierta con paneles fotovoltaicos en función de la superficie útil de tejado empleada por cada tecnología

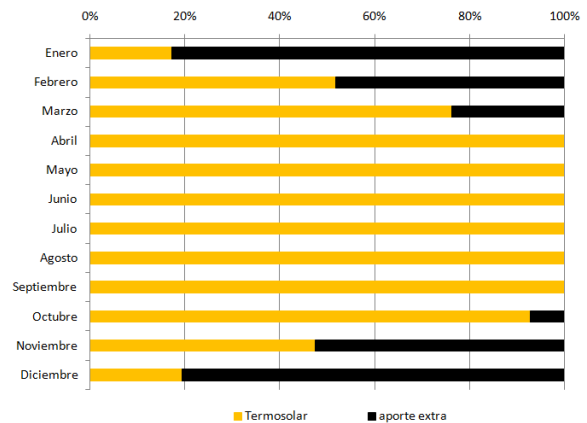


Figura 3: Porcentaje de energía necesaria para calentar agua cubierta con paneles termosolares en el diseño optimizado

en cuanto demuestran no solo el enorme potencial de la energía solar fotovoltaica instalada en edificios sino la posibilidad de desarrollar este potencial junto con los paneles termosolares que permitan un ahorro de energía utilizada en calentar agua.

## Bibliografía

- [1] A.B. Cuenli, M. Alonso, F. Chenlo, Estimation of the potential of dwelling buildings as PV generators. Analysis of load curve versus PV production
- [2] Censos de Población y Viviendas, 2001. Instituto Nacional de Estadística <http://www.ine.es/censo2001>
- [3] Informe anual 2009. Asociación de la Industria Fotovoltaica (ASIF)
- [4] Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), Joint Research Center <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>
- [5] Balance Energético de la Comunidad de Madrid 2009, Consejería de Economía y Hacienda Comunidad de Madrid
- [6] Instituto de estadística de la Comunidad Autónoma de Madrid
- [7] Guía práctica de la energía. Consumo eficiente y responsable, IDAE (Instituto para la diversificación y ahorro de energía)