

Memoria del Proyecto de Investigación

Análisis de la viabilidad energética de instalaciones de autoconsumo para distintos sectores de aplicación

Fundación Renovables
Madrid, noviembre de 2017

Índice

Introducción y Objetivos	3
Metodología.....	7
Balance energético del sistema	7
Parámetros de eficiencia	9
Ahorro energético: autoconsumo y autosuficiencia	10
Aplicación 1. Sistema fotovoltaico de autoconsumo para abastecimiento eléctrico de taller de mecanizado y soldadura	11
Caracterización del consumo	11
Resultados	14
Discusión de los resultados y conclusiones	20
Aplicación 2. Sistema fotovoltaico de autoconsumo para un centro de educación secundaria	24
Caracterización del consumo	24
Resultados	25
Discusión de los resultados y conclusiones	27
Aplicación 3. Sistema fotovoltaico de autoconsumo para un supermercado	32
Caracterización del consumo.....	32
Resultados	34
Discusión de los resultados y conclusiones	36
Conclusiones generales del estudio: futuras líneas de investigación.....	41
Bibliografía	43

Introducción y objetivos

Las instalaciones fotovoltaicas de autoconsumo por desarrollo tecnológico y costes se han convertido en una alternativa real para la generación de energía eléctrica. Estos sistemas tienen la ventaja de generar su electricidad en el punto de consumo, intercambiando de forma bidireccional con la red eléctrica tanto los excedentes de energía como la energía necesaria cuando la producción fotovoltaica sea menor que la demanda.

El correcto dimensionado de estos sistemas debe ser un compromiso entre los ahorros energéticos que se producen y la inversión necesaria. Teniendo en cuenta que el intercambio de energía se realiza de forma instantánea, para conocer estos ahorros es fundamental conocer de la forma más precisa posible la curva de consumo.

Teniendo en cuenta que conocer los consumos instantáneos de cualquier consumo no es posible, una buena aproximación es considerar valores horarios.

En este trabajo de investigación queremos estudiar la evolución de los ahorros energéticos que se producen en instalaciones de autoconsumo fotovoltaico para distintas aplicaciones, que por sus características deberían permitir coeficientes de autoconsumo importantes, así como la evolución de los mismos en función de la potencia pico instalada. En concreto se va a estudiar la viabilidad energética de instalaciones de autoconsumo fotovoltaico en un taller mecánico, un colegio de secundaria y un centro comercial.

El objetivo de este proyecto es conocer que se puede esperar de las instalaciones de autoconsumo fotovoltaico en diferentes sectores de aplicación. El análisis de los resultados debe permitir hacer recomendaciones sobre cuál debería ser la potencia pico óptima de paneles fotovoltaicos en las diferentes aplicaciones y de qué parámetros depende.

Seleccionamos un emplazamiento en cada una de las zonas climáticas de España que establece el Código Técnico de la Edificación, en la sección HE 5, para realizar el presente estudio comparativo:



Figura 1. Zonas climáticas de España. (Fuente: CTE-HE5).

Cada zona climática se define según su radiación solar global diaria sobre superficie horizontal (H) que se muestra en la Tabla I:

Zona climática	kWh/m ²
I	$H < 3,8$
II	$3,8 \leq H < 4,2$
III	$4,2 \leq H < 4,6$
IV	$4,6 \leq H < 5,0$
V	$H \geq 5,0$

Tabla I. Radiación solar global diaria anual en cada zona climática. (Fuente: CTE-HE5).

Los emplazamientos seleccionados son los que se muestran en la Tabla II.

Zona I	Zona II	Zona III	Zona IV	Zona V
La Coruña	Burgos	Lérida	Málaga	Sta. Cruz de Tenerife
43,33°N/ -8,42°E	42,35°N/ -3,68°E	41,617°N/ 0,633°E	36,66°N/ -4,483°E	28,47°N/-16,25°E

Tabla II. Emplazamientos seleccionados para el estudio comparativo.

Las características climáticas de dichos emplazamientos quedan resumidas en la siguiente Tabla:

	Zona I	Zona II	Zona III	Zona IV	Zona V
	La	Burgos	Lérida	Málaga	Sta. Cruz de Tenerife
	Coruña	Burgos	Lérida	Málaga	Tenerife
Temperatura media anual (°C)	14,8	10,7	15	18,5	21,5
Precipitación media anual (mm)	1014	546	342	534	226
Número medio anual de días de precipitación	129,6	83,5	46,2	42,3	29,7
Número medio anual de días de nieve o de helada	0,3	89,4	42,8	0,2	0
Número medio anual de días despejados	48,6	55,1	102,9	109,1	92
Número medio anual de horas de sol	2010	2223	2712	2905	2913

Tabla III. Valores climáticos normales medios entre 1983-2010 de los diferentes emplazamientos.

Fuente AEMET.

Con el fin de optimizar la energía anual producida por el sistema fotovoltaico, los módulos fotovoltaicos se han situado orientado al Sur y con una inclinación de 30 grados para las localidades de La Coruña, Lérida, Burgos y Málaga y 25 grados para Santa Cruz de Tenerife.

En la siguiente figura puede observarse la energía solar mensual recibida sobre el plano del generador para cada uno de los emplazamientos seleccionados. Dichos valores han sido obtenidos de *Meteonorm* para las inclinaciones citadas anteriormente y que maximiza la producción anual en cada uno de los emplazamientos. Se aprecia claramente en cada una de las curvas la tendencia estacional invierno – verano. Para la ubicación en Burgos (Zona II) la curva es muy pronunciada, presentando valores muy dispares entre invierno y verano, mientras que para la zona V, Tenerife, la curva se suaviza y no hay tantas discrepancias entre los valores estacionales.

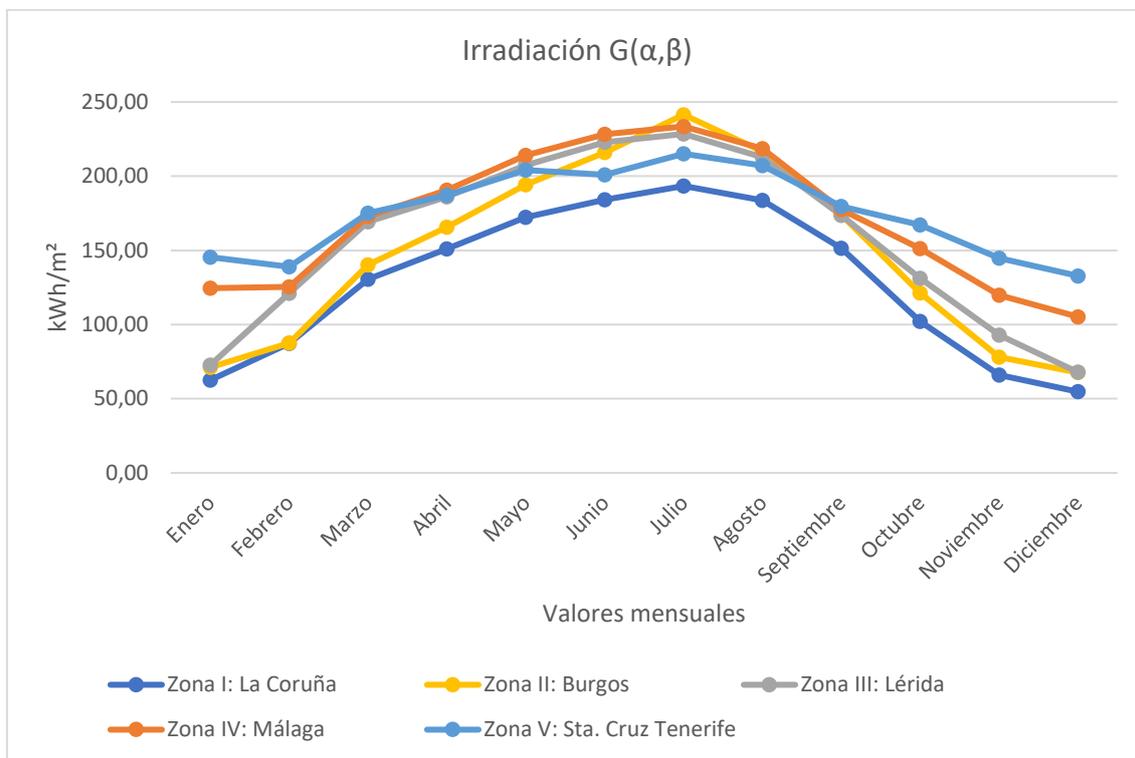


Figura 2. Energía mensual recibida sobre el plano del generador en los diferentes emplazamientos.

En el periodo anual bajo estudio, los valores medios diarios y el valor anual de energía solar recibida son:

	Zona I La Coruña	Zona II Burgos	Zona III Lérida	Zona IV Málaga	Zona V Sta. Cruz de Tenerife
Valores medios diarios [kWh/m²]	4,22	4,86	5,17	5,65	5,75
Total anual [kWh/m² año]	1539	1774	1886	2062	2098

Tabla IV. Energía solar anual y media diaria recibida en el plano del generador en los distintos emplazamientos.

Metodología

La metodología seguida para la realización de este estudio es la siguiente:

- Seleccionar perfiles de consumo típicos de las diferentes aplicaciones propuestas.
- Seleccionar la ubicación de estas aplicaciones. Buscar valores disponibles de irradiación solar y de temperatura ambiente para cada localidad a estudiar.
- Definir una instalación fotovoltaica conectada a red, capaz de suministrar este consumo
- Hacer una simulación con valores horarios del balance energético del sistema, con el fin de determinar los parámetros de eficiencia de la misma.
- Determinar los valores de autoconsumo y autosuficiencia del sistema
- Realizar un análisis de la sensibilidad de estos parámetros con la potencia pico instalada.
- Discusión de los resultados y conclusiones.

Los diferentes perfiles de irradiación solar y de temperatura, así como los perfiles típicos de consumo para cada una de las aplicaciones propuestas se describirán más adelante.

Balance de energía del sistema

El balance de energía es un método que permite dimensionar el sistema fotovoltaico en base a la caracterización del consumo, de acuerdo con los datos meteorológicos obtenidos para la localidad en estudio. La finalidad es ajustar la generación fotovoltaica a las condiciones de demanda de la carga en un determinado período de tiempo.

El balance energético horario permite evaluar al sistema teniendo en cuenta la variabilidad de la carga y de los parámetros meteorológicos, (radiación y temperatura ambiente) con el fin de obtener un diseño que optimice la producción fotovoltaica y los valores de autoconsumo y autosuficiencia.

A continuación, se describe el procedimiento de cálculo empleado.

La potencia generada por el generador fotovoltaico P_m en cualquier condición de irradiancia G y temperatura de célula T_c se calcula de acuerdo con el método propuesto por *Osterwald*, cuya expresión matemática es la siguiente:

$$P_m = P_{m,ref} \frac{G}{G_{ref}} \left[1 + \gamma (T_c - T_{c,ref}) \right]$$

donde $P_{m,ref}$ es la potencia del generador en condiciones estándar, G_{ref} es la irradiancia en condiciones estándar (1000 W/m^2), $T_{c,ref}$ es la temperatura de los módulos en condiciones estándar y γ el coeficiente de pérdidas de potencia con la temperatura. Se mide en $\%/^{\circ}\text{C}$ y tiene un valor diferente para cada tecnología de módulos.

En nuestro estudio, hemos supuesto que nuestro generador está formado por módulos de silicio policristalino.

La temperatura de operación de los módulos T_c en función de la temperatura ambiente se obtiene mediante la siguiente ecuación,

$$T_c = T_a + \frac{TONC - 20}{800} \cdot G$$

donde, T_a es la temperatura ambiente, G es la irradiancia y $TONC$ es la Temperatura de Operación Nominal del módulo fotovoltaico.

Una vez determinada la potencia generada por los módulos fotovoltaicos en condiciones de operación, es necesario calcular las pérdidas producidas en el sistema cuando trabaja en condiciones reales.

En la siguiente Tabla se muestran las pérdidas consideradas con sus correspondientes valores estimados.

Factores de pérdidas	Valor estimado	Factor
Reflectancia angular y espectrales	0,03	0,97
Cableado	0,02	0,98
Dispersión de parámetros en el generador	0,02	0,98
Polvo y/o suciedad en los módulos	0,03	0,97
Errores en el seguimiento del PMP	0,02	0,98

Tabla V. Valores medios anuales estimados de las pérdidas en un generador fotovoltaico.

El generador fotovoltaico lo consideramos exento de sombras por lo que se descartan pérdidas por este factor. Mientras que las pérdidas debido a la temperatura ambiente ya se están consideradas en la expresión de *Osterwald*.

Para determinar la energía en corriente alterna tenemos que tener en cuenta el rendimiento del inversor. Los rendimientos de los inversores fotovoltaicos pueden modelizarse de acuerdo con la ecuación propuesta por Schmidt a partir de la potencia de la potencia de entrada (p_{in}) al inversor.

$$\eta_b = \frac{P_{in} - (b_0 + b_1 \cdot P_{in} + b_2 \cdot P_{in}^2)}{P_{in}}$$

Donde se han considerado como parámetros normalmente utilizados en la bibliografía

$$b_0=0,02 \quad b_1=0,02 \quad b_2=0,07$$

El rendimiento del inversor es función de la potencia de entrada, además de la temperatura y el voltaje, por lo tanto, el comportamiento del inversor es no lineal. A partir del valor del rendimiento obtenido podemos calcular la potencia de salida a partir de la expresión

$$\eta_b = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}}$$

Por último se incluyen las pérdidas por cableado en alterna, que van a depender de la distancia del inversor al punto de conexión con la red eléctrica. En nuestro caso se han supuesto unas pérdidas del 1%.

Parámetros de eficiencia

Los parámetros de eficiencia permiten evaluar el funcionamiento del sistema solar fotovoltaico en términos comparables y cuantificables a fin de establecer el rendimiento máximo esperable.

De los distintos parámetros de eficiencia para el sistema o parte de él, se aplicarán el Performance Ratio (PR) y el *Yield*, que son indicadores que engloban el rendimiento energético de toda la instalación.

- El performance ratio PR nos habla del tanto por ciento de energía que se ha perdido en el sistema respecto al que se hubiera generado sin pérdidas, es decir con la instalación funcionando al rendimiento medido de los módulos en condiciones estándar. PR no depende ni del tamaño del sistema ni de la radiación solar incidente, por lo que es el parámetro que se utiliza para comparar entre sí distintos sistemas. Se mide en %

$$PR = \frac{E_{AC}}{E_{ideal}} \times 100$$

donde:

E_{ideal} : es el producto de la energía solar recibida por el rendimiento del sistema en CEM.

$$E_{ideal} = E_{solar} \cdot \eta_{STC}$$

- El Yield o productividad es dependiente de la energía solar incidente, muestra cuanta energía produce por cada KWp instalado. Resulta del cociente entre la
-

energía diaria producida y los vatios pico instalados, y por tanto sus unidades son (*kWh/kWp*)

$$Yield = \frac{E_{CA}}{P_{n,PV}}$$

donde:

$P_{n,PV}$: es la potencia nominal del generador en Condiciones Estándar de Medida.

Ahorro energético. Autoconsumo y autosuficiencia

Autoconsumo: se define como la energía que se aprovecha directamente de los paneles solares y por lo tanto no se inyecta a la red. Es un indicador que resulta del cociente entre la energía consumida del sistema FV sobre la energía obtenida a la salida del inversor en un período de tiempo.

$$\% \text{ Autoconsumo} = \frac{\text{Energía fotovoltaica consumida}}{\text{Energía total fotovoltaica producida}} \cdot 100$$

Autosuficiencia: se define como la Energía que se aprovecha directamente del sistema FV respecto al consumo total de la instalación. Se obtiene de la relación entre la energía consumida del sistema FV sobre el consumo en un mismo período de tiempo.

$$\% \text{ Autosuficiencia} = \frac{\text{Energía fotovoltaica consumida}}{\text{Consumo total}} \cdot 100$$

La autosuficiencia es directamente el ahorro en la factura eléctrica en el periodo de tiempo considerado.

De acuerdo con estas expresiones cuando los valores de autoconsumo y autosuficiencia coinciden, la instalación fotovoltaica es capaz de producir anualmente la misma energía que necesitamos para cubrir el consumo.

Como potencia pico inicial para nuestro estudio se ha considerado un tamaño de sistema fotovoltaico que cumpla esta condición. A posteriori, el análisis de sensibilidad de estos parámetros con la potencia pico instalada nos permitirá discutir sobre el tamaño óptimo del sistema.

Aplicación 1. Sistema fotovoltaico de autoconsumo para abastecimiento eléctrico de taller de mecanizado y soldadura.

En primer lugar, se estudian las posibilidades de un sistema de autoconsumo fotovoltaico para una nave industrial de mecanizado de elementos metálicos y trabajos de soldadura ubicada en Málaga.

Caracterización del consumo:

La nave dispone de una potencia contratada de 13,15 kW con tensión de entrada a 400 V trifásica (3 Fases y Neutro). El horario de trabajo es de 8:00 a 14:00 y de 16:00 a 21:00 (11 horas) de lunes a viernes, el consumo fuera de estas horas es 0. Un día a la semana, los trabajos se realizan fuera de la nave con maquinaria portátil, por lo que la demanda será igualmente 0.

El volumen de trabajo es un dato poco predecible dependiente de la demanda de los clientes, por lo que se ha establecido una curva de consumo diaria máxima tipo en las horas de trabajo como referencia, estableciendo las máquinas empleadas en el día a día y su tiempo aproximado de uso con ayuda del propietario del negocio.

Dicha curva será multiplicada por factores de reducción aleatorios comprendidos en un estrecho rango, por ejemplo [0,55 – 0,7], para cada mes de facturación, haciendo coincidir lo calculado con la lectura real de la compañía. De esta forma se pretende conseguir un consumo estimado hora a hora que permita un análisis más preciso de la instalación. Se han utilizado datos de facturación eléctrica correspondiente al período de facturación 2015-2016. El uso que se le da a la nave es exclusivamente en días laborables sin ningún consumo para el resto de días. Por ello se ha contabilizado el número de días trabajados para cada mes y el consumo medio mensual para estos días. Estos valores de días trabajados van a condicionar los resultados obtenidos.

	Consumo mensual [kWh/mes]	Días laborables	Consumo medio mensual [kWh/días lab.]
Enero	602	17	35,4
Febrero	718	16	44,9
Marzo	828	18	46,0
Abril	925	18	51,4
Mayo	1016	18	56,4
Junio	874	17	51,4
Julio	832	17	48,9

Agosto	642	18	35,6
Septiembre	803	19	42,3
Octubre	809	17	47,6
Noviembre	748	18	41,5
Diciembre	530	17	31,2
Anual	9327	210	44,4

Tabla VI. Resumen de los consumos considerados.

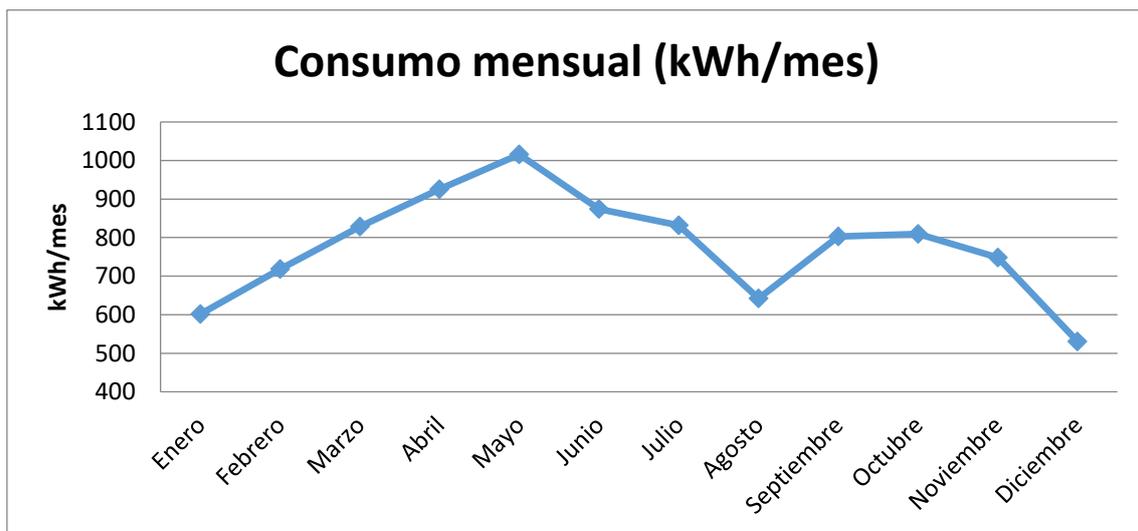


Figura 3. Valores mensuales de los consumos considerados.

Los meses precedentes a la época de verano presentan el mayor consumo anual, sin embargo, el mes de agosto presenta un consumo realmente bajo, dato que tendrá especial relevancia a la hora de aprovechar la máxima generación de energía fotovoltaica, dada en los meses centrales del año.

Al no ser posible acceder al portal virtual de la distribuidora eléctrica y conocer los datos de consumo hora a hora reales, debemos atajar este problema desde otro punto de vista. Para ello, se ha establecido junto con ayuda del propietario del local, una curva típica de consumo para un día donde el trabajo realizado sea el de mayor volumen. Es necesario así, conocer que maquinarias y que tiempo de uso se les da a lo largo del día. La maquinaria y los elementos de consumo de la nave se recogen en la siguiente Tabla:

	Consumo (W)	Horas de uso (h)	Consumo total (Wh)
Iluminarias	1362	11	14982
Ordenador	343	11	3773
Nevera	220	11	2420
3 Extractores centrífugos	2250	7	15750
2 Extractores axiales	740	7	5180

Plegadora "Mebusa"	6300	0,2	1260
Cizalladora "Korpleg"	15370	0,2	3074
Autógena (Compact)	5060	0,5	2530
Autógena (Esab)	4140	0,5	2070
Taladradora (AJA)	745	1	745
Punzadora (Peddicat 360)	4000	0,1	400
2 Radiales	4400	2	8800
Motor TM	1400	0,3	420
Total			61404

Tabla VII. Consumos eléctricos de la maquinaria del taller.

El uso de maquinaria pesada (Plegadora, Cizalla,...) conlleva unos picos de corriente muy elevados y solo supondrían un problema para una instalación con acumuladores de energía (Baterías) necesitando un inversor más potente. Por consiguiente, una instalación conectada a red absorberá estos picos de intensidad y podremos simplificar el consumo de las máquinas como constante en los arranques y paros.

A partir de estos datos se puede establecer un perfil tipo de consumo diario para esta aplicación.

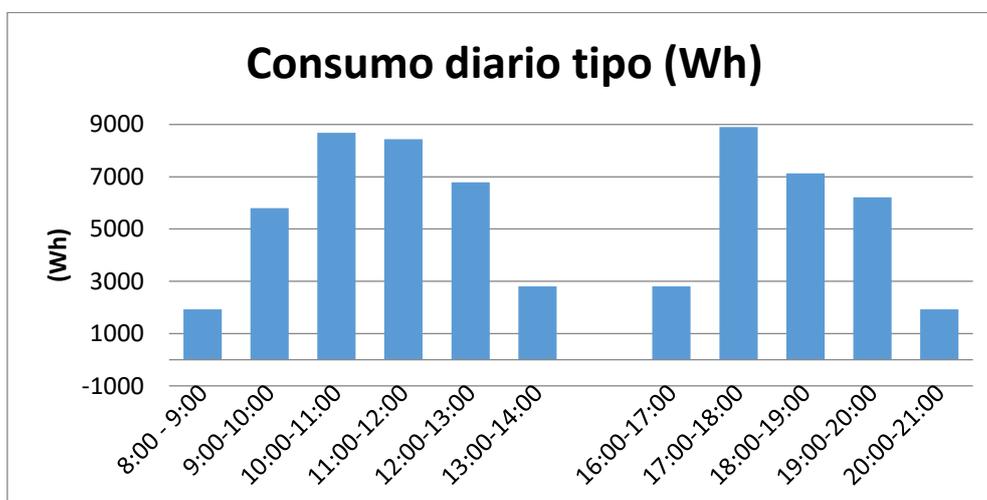


Figura 4. Consumo horario tipo de un día de trabajo.

Para obtener a partir de la curva tipo, los valores de consumo de cada día del año, se ha procedido a multiplicar ésta por factores de reducción. Independientemente del día del año, el mayor consumo se da en las horas medias de la mañana y la tarde, por tanto, podemos asegurar que el resto de curvas seguirá el mismo patrón de consumo pero con una reducción de su valor total.

Resultados

De acuerdo con la metodología presentada se ha realizado el dimensionado de una instalación fotovoltaica conectada a red en régimen de autoconsumo que tiene las siguientes características técnicas.

Generador fotovoltaico de 5400 Wp formado por 20 módulos fotovoltaicos conectados en dos ramas con 10 módulos en serie para cada una, en la azotea del edificio y con una distancia de separación entre ellas de manera que se eviten las sombras. El resumen de las características del generador son las siguientes:

- Número total de módulos: 20
- Número de módulos en serie: 10 y 10
- Número de ramas: 2
- Disposición de 2 filas 10 y 10 módulos colocados verticalmente
- Inclinación de 33º
- Azimut 0º (Sur).
- Potencia máxima (pico) de 5400 Wp
- Tensión en circuito abierto (V_{oc}) de 383 V
- Tensión en el punto de máxima potencia de 310 V
- Corriente de cortocircuito (I_{sc}) de 9,16 A
- Corriente en el punto de máxima potencia de 8,71 A

El inversor se encargará de transformar la corriente en continua a la que trabajan los módulos, en corriente alterna aprovechable directamente por la instalación. Su valor nominal de potencia limita la potencia de la instalación siendo inferior a la potencia pico instalada, esto es así ya que los paneles pocas veces trabajan en condiciones estándares de medida, si no a un rendimiento menor.

Se ha seleccionado un inversor trifásico de la marca SMA, modelo *Sunny Tripower* 5000TL y potencia nominal de 5000 VA. Sus características principales son:

Datos técnicos	Sunny Tripower 5000TL
Entrada (CC)	
Potencia máxima de CC (con $\cos \phi = 1$)	5 100 W
Tensión de entrada máx.	1 000 V
Rango de tensión MPP / tensión asignada de entrada	245 V - 800 V / 580 V
Tensión de entrada mín. / de inicio	150 V / 188 V
Corriente máx. de entrada, entradas: A / B	11 A / 10 A
Corriente máx. de entrada por string, entradas: A / B	11 A / 10 A
Número de entradas de MPP independientes / strings por entrada de MPP	2 / A:2; B:2
Salida (CA)	
Potencia asignada (a 230 V, 50 Hz)	5 000 W
Potencia máx. aparente de CA	5 000 VA
Tensión nominal de CA	3 / N / PE; 220 / 380 V 3 / N / PE; 230 / 400 V 3 / N / PE; 240 / 415 V
Rango de tensión nominal de CA	160 V - 280 V
Frecuencia de red de CA / rango	50 Hz, 60 Hz/5 Hz ... +5 Hz
Frecuencia / tensión asignada de red	50 Hz / 230 V
Corriente máx. de salida	7,3 A
Factor de potencia a potencia asignada	1
Factor de desfase ajustable	0,8 inductivo ... 0,8 capacitivo
Fases de inyección / conexión	3 / 3
Rendimiento	
Rendimiento máx. / europea	98 % / 97,1 %

Figura 5. Características de un inversor trifásico de la marca SMA, modelo Sunny Tripower 5000TL y potencia nominal de 5000 VA.

La producción fotovoltaica de este sistema y los parámetros de eficiencia son los siguientes:

En el periodo anual bajo estudio, los valores medios diarios y el valor anual de energía alterna generada son:

	Zona I La Coruña	Zona II Burgos	Zona III Lérida	Zona IV Málaga	Zona V Sta. Cruz de Tenerife
Valores medios diarios [kWh]	18,54	20,34	11,69	21,0	22,7
Total anual [kWh/año]	6592	7425	7680	8264	8287

Tabla VIII. Energía generada anual y media diaria en los distintos emplazamientos.

En el periodo anual bajo estudio, los valores medios diarios y el valor anual de productividad y del performance ratio son:

	Zona I La Coruña	Zona II Burgos	Zona III Lérida	Zona IV Málaga	Zona V Sta. Cruz de Tenerife
Valores medios diarios [kWh/kWp]	3,28	3,70	3,83	4,15	4,16
Yf [kWh/kWp año]	1208	1361	1408	1515	1519
PR	78,5%	76,7%	74,7%	73,5%	72,4%

Tabla IX. Productividad anual y media diaria en los distintos emplazamientos.

A continuación, se representan las gráficas de consumo medio y energía generada media por el sistema fotovoltaico para los meses de enero, junio y septiembre para el caso de Málaga:

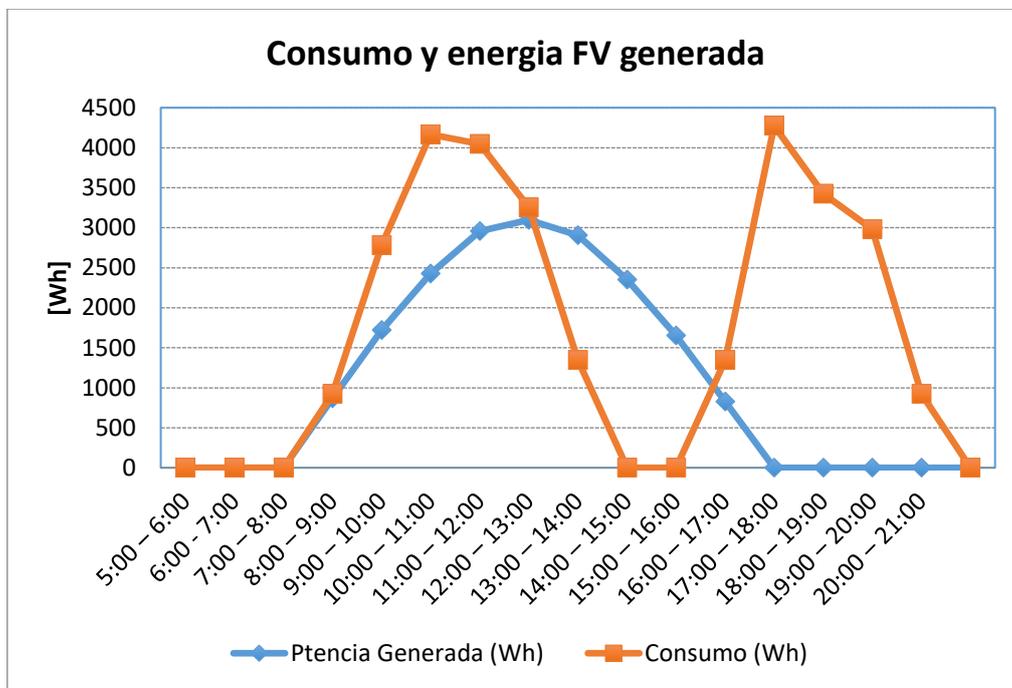


Figura 6. Perfil típico de consumo y energía FV generada para un día de enero.

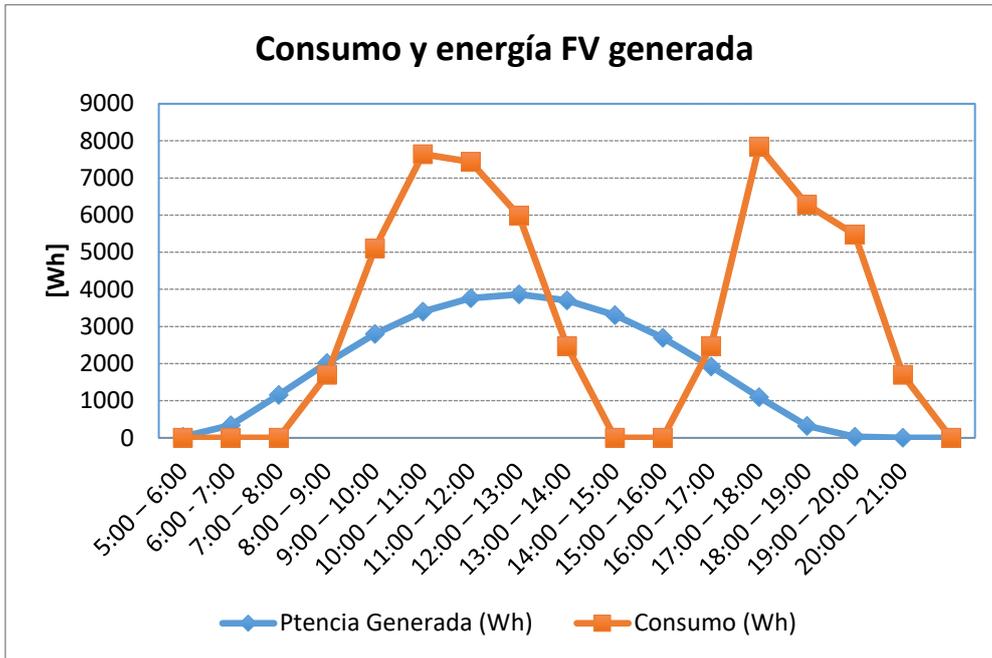


Figura 7. Perfil típico de consumo y energía FV generada para un día de junio.

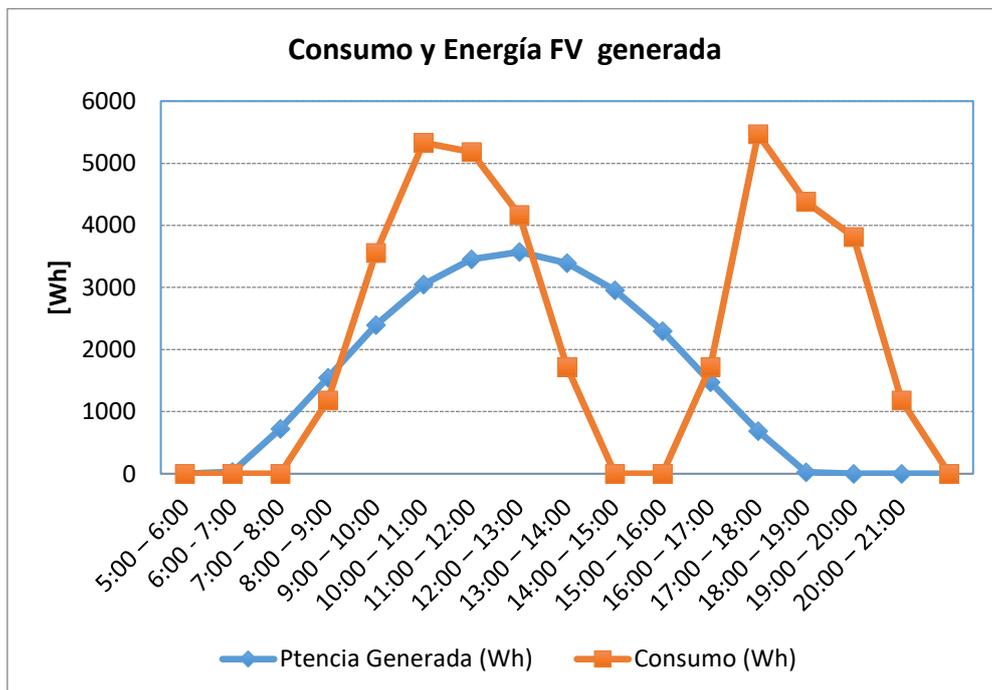


Figura 8. Perfil típico de consumo y energía FV generada para un día de septiembre.

Como se puede observar, los días laborables, gran parte de la energía FV generada es aprovechada directamente. Sin embargo el gran número de días en los que al cabo del año el taller no tiene actividad, hace que estos porcentajes sean menores.

El análisis de sensibilidad del autoconsumo y de la autosuficiencia en función de la potencia pico para todas las localidades estudiadas ofrece los siguientes resultados:

Autoconsumo					
Potencia pico (W)	Zona I La Coruña	Zona II Burgos	Zona III Lérida	Zona IV Málaga	Zona V Sta. Cruz de Tenerife
1000	42,2	44,5	44,4	43,4	42,9
2000	42,2	44,4	44,4	43,4	42,9
3000	41,7	43,7	43,9	42,8	42,2
4000	40,5	42,4	42,5	41,4	40,4
5000	39,2	40,8	41,1	39,8	38,6
6000	37,9	39,1	39,6	38,3	37,1
7000	36,7	37,6	38,0	36,8	35,7
8000	35,5	36,0	36,4	35,3	34,5
9000	34,2	34,3	34,8	33,8	33,4
10000	32,9	32,7	33,1	32,2	32,2

Tabla X. Valores de autoconsumo obtenidos para las distintas ciudades en función de la potencia pico instalada.

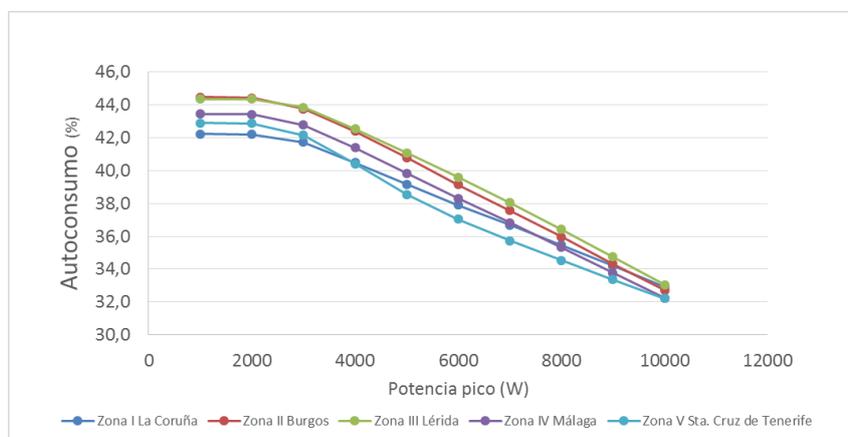


Figura 9. Representación de los valores de autoconsumo obtenidos para las distintas ciudades en función de la potencia pico instalada.

Autosuficiencia					
Potencia pico (W)	Zona I La Coruña	Zona II Burgos	Zona III Lérida	Zona IV Málaga	Zona V Sta. Cruz de Tenerife
1000	5,9	7,1	7,5	7,9	7,8
2000	11,9	14,2	14,9	15,8	15,5
3000	17,6	21,0	22,1	23,3	22,9
4000	22,8	27,2	28,6	30,0	29,2
5000	27,6	32,7	34,5	36,2	34,8
6000	32,0	37,6	40,0	41,7	40,2
7000	36,1	42,1	44,8	46,8	45,2
8000	39,9	46,1	49,0	51,3	49,9
9000	43,3	49,5	52,6	55,2	54,3
10000	46,3	52,4	55,6	58,5	58,2

Tabla XI. Valores de autosuficiencia obtenidos para las distintas ciudades en función de la potencia pico instalada.

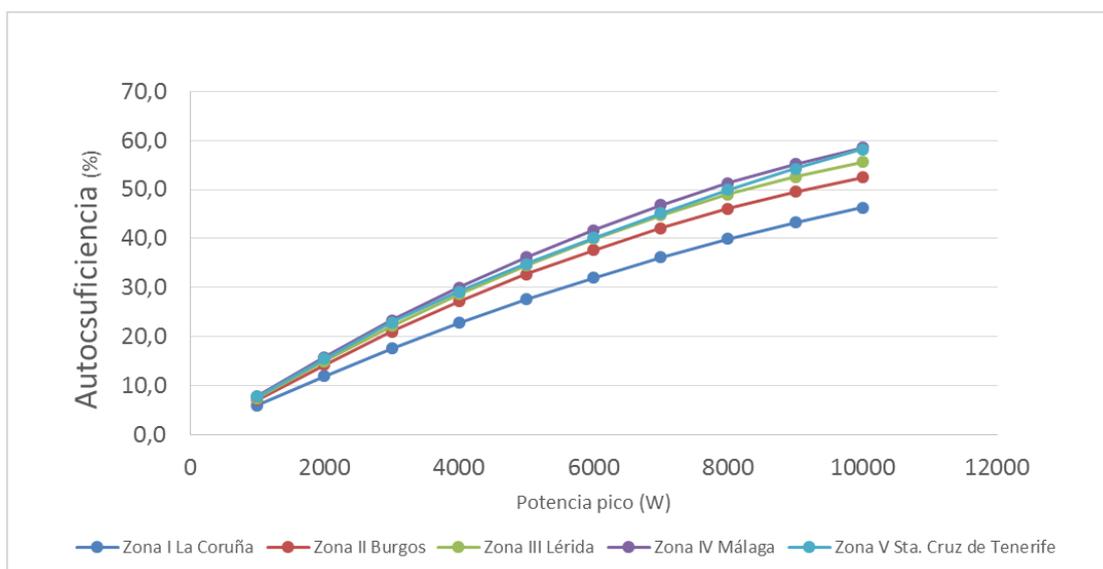


Figura 10. Representación de los valores de autosuficiencia obtenidos para las distintas ciudades en función de la potencia pico instalada.

Discusión de los resultados y conclusiones

De acuerdo con las curvas presentadas anteriormente, podemos ver que la energía autoconsumida en esta aplicación no alcanza para ninguna localidad estudiada valores por encima del 50%. Esto significa que incluso a potencias fotovoltaicas instaladas bajas se enviará a la red más del 50 % de toda la energía producida. Este porcentaje es mayor en ciudades con menos insolación. Según aumentamos la potencia pico instalada, los porcentajes de energía autoconsumida bajan en todas las localidades y a partir de una potencia instalada de 3.0 kW lo hacen de forma prácticamente lineal.

Los valores de autosuficiencia siguen la tendencia contraria, con valores muy pequeños para baja potencia instalada y que van aumentando según aumenta la potencia pico. Se observan mayores porcentajes de autosuficiencia en las localidades con mayor insolación. Así para instalaciones de 10 kWp dependiendo de la localidad se obtiene porcentajes entre el 46 % para La Coruña y 58 % para Santa Cruz de Tenerife.

Si representamos conjuntamente para cada localidad las dos curvas (autoconsumo y autosuficiencia) observamos que el punto de corte de las mismas es distinto para cada localidad. Es decir, necesitamos mayor potencia pico instalada para suministrar el mismo consumo en aquellas localidades con menor insolación.

En este punto los valores de autosuficiencia alcanzados son también distintos. En las ciudades con menor insolación, como La Coruña, se alcanza una autosuficiencia del 36.2 % para potencias instaladas de 7000 Wp, mientras que en Málaga se alcanzan valores del 40% con instalaciones de 5500 Wp.

En las tablas y gráficas siguientes se presentan estos resultados. En las tablas se ha marcado la zona donde se produce el punto de corte entre las dos curvas.

Potencia pico (W)	Zona I Autocons.	Zona I Autosuf.	Zona IV Autocons.	Zona IV Autosuf.
1000	42,2	5,9	43,4	7,9
2000	42,2	11,9	43,4	15,8
3000	41,7	17,6	42,8	23,3
4000	40,5	22,8	41,4	30,0
5000	39,2	27,6	39,8	36,2
6000	37,9	32,0	38,3	41,7
7000	36,7	36,1	36,8	46,8
8000	35,5	39,9	35,3	51,3
9000	34,2	43,3	33,8	55,2
10000	32,9	46,3	32,2	58,5

Tabla XII. Valores comparativos de autoconsumo y autosuficiencia para La Coruña y Málaga en función de la potencia pico instalada.

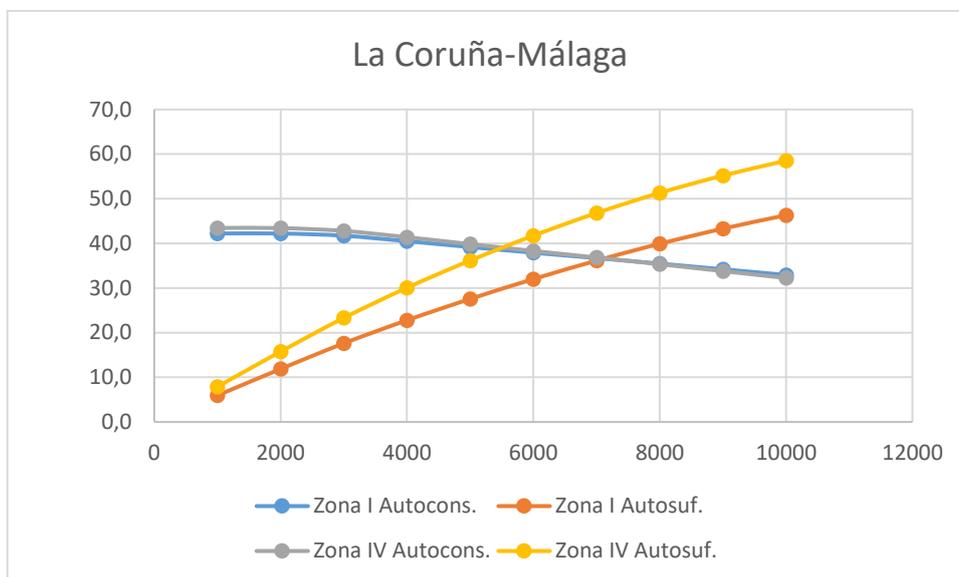


Figura 11. Representación de los valores de autoconsumo y autosuficiencia para La Coruña y Málaga en función de la potencia pico instalada.

Potencia pico (W)	Zona II Autocons.	Zona II Autosuf.	Zona III Autocons.	Zona III Autosuf.
1000	44,5	7,1	44,4	7,5
2000	44,4	14,2	44,4	14,9
3000	43,7	21,0	43,9	22,1
4000	42,4	27,2	42,5	28,6
5000	40,8	32,7	41,1	34,5
6000	39,1	37,6	39,6	40,0
7000	37,6	42,1	38,0	44,8
8000	36,0	46,1	36,4	49,0
9000	34,3	49,5	34,8	52,6
10000	32,7	52,4	33,1	55,6

Tabla XIII. Valores comparativos de autoconsumo y autosuficiencia para Burgos y Lérida en función de la potencia pico instalada.

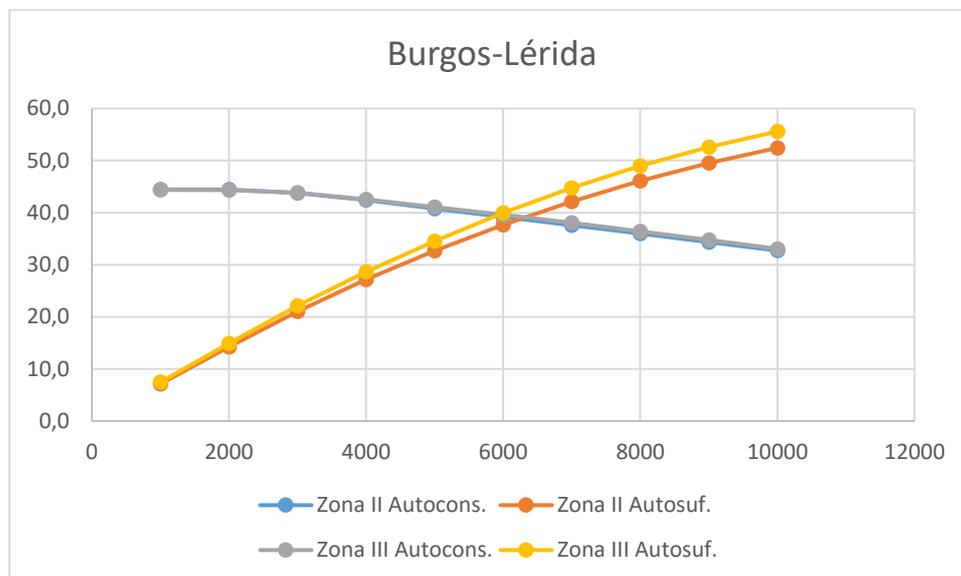


Figura 12. Representación de los valores de autoconsumo y autosuficiencia para La Burgos y Lérida en función de la potencia pico instalada.

Potencia pico (W)	Zona IV Autocons.	Zona IV Autosuf.	Zona V Autocons.	Zona V Autosuf.
1000	43,4	7,9	42,9	7,8
2000	43,4	15,8	42,9	15,5
3000	42,8	23,3	42,2	22,9
4000	41,4	30,0	40,4	29,2
5000	39,8	36,2	38,6	34,8
6000	38,3	41,7	37,1	40,2
7000	36,8	46,8	35,7	45,2
8000	35,3	51,3	34,5	49,9
9000	33,8	55,2	33,4	54,3
10000	32,2	58,5	32,2	58,2

Tabla XIV. Valores comparativos de autoconsumo y autosuficiencia para Málaga y Santa Cruz de Tenerife en función de la potencia pico instalada.

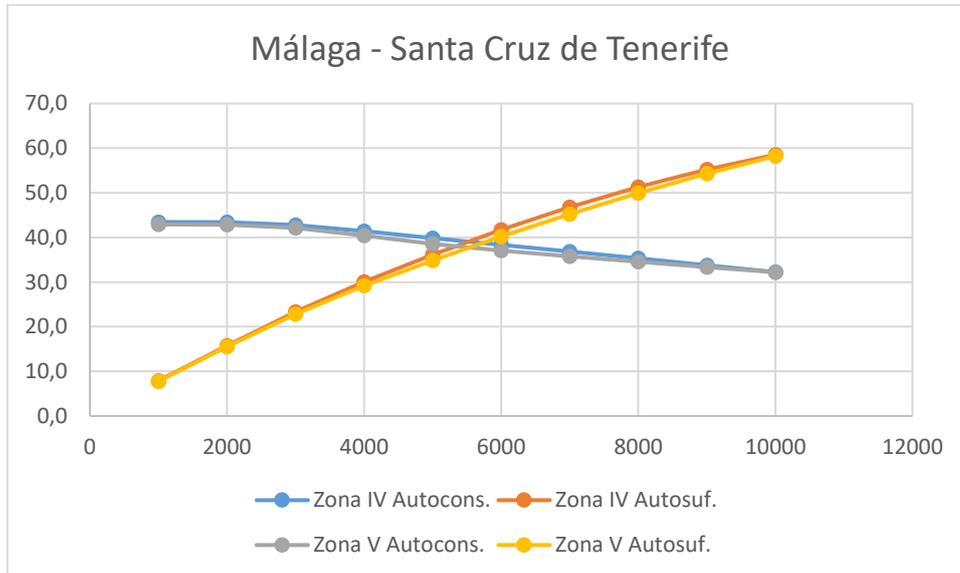


Figura 13. Representación de los valores de autoconsumo y autosuficiencia para Málaga y Santa Cruz de Tenerife en función de la potencia pico instalada.

Los resultados presentados muestran que el consumo en estas aplicaciones industriales puede ser cubierto parcialmente con instalaciones fotovoltaicas de autoconsumo. La autosuficiencia (ahorro energético) que se alcanza con instalaciones situadas en las condiciones climáticas del Sur de España llega a ser próxima al 40 %. En estas condiciones el 40 % de la producción fotovoltaica es aprovechada directamente por el consumidor, mientras que el 60% restante se envía a la red.

Teniendo en cuenta la legislación española y la tendencia que presentan las curvas de autosuficiencia presentadas, podemos afirmar que para estas aplicaciones una potencia instalada fotovoltaica mayor de 5 kWp no es aconsejable. Este valor representa una potencia instalada del 80% de la necesaria para que el sistema FV suministre la energía necesaria para cubrir el consumo del sistema.

Hay que destacar que estos resultados están condicionados por el número de días al año con actividad en el taller. En nuestro caso, estos talleres funcionan 210 días al año, lo que supone sólo el 57% de los días del año.

Aplicación 2. Sistema fotovoltaico de autoconsumo para un centro de educación secundaria.

En primer lugar, se estudia las posibilidades de un sistema de autoconsumo fotovoltaico para el suministro de energía a un centro de enseñanza de educación secundaria. Se realiza un estudio comparativo de los parámetros energéticos en cada una de las localidades estudiadas.

Caracterización del consumo

Al no haber encontrado datos disponibles de consumo eléctrico de estos centros en España, hemos utilizado los perfiles de consumo de establecimientos comerciales, empleados en el estudio *Nationwide Analysis of U. S. Commercial Building Solar Photovoltaic (PV) Breakeven Conditions* (Davidson, Gagnon, Denholm, y Margolis, 2015), el cual analiza el umbral de rentabilidad de las instalaciones de energía solar fotovoltaica en establecimientos comerciales de Estados Unidos. Dicho estudio está elaborado por el NREL. En esta base de datos pueden verse perfiles horarios de carga eléctrica de 16 tipos de establecimientos.

Para los centros escolares, hemos tenido que adaptar estos consumos para considerar los periodos vacacionales existentes en España. En estos periodos se ha considerado el mismo consumo que los fines de semana que no hay actividad en los colegios.

En la figura 14 puede verse el valor medio de los consumos diarios mensuales considerados. Se aprecia cómo los consumos disminuyen drásticamente en los periodos no lectivos.

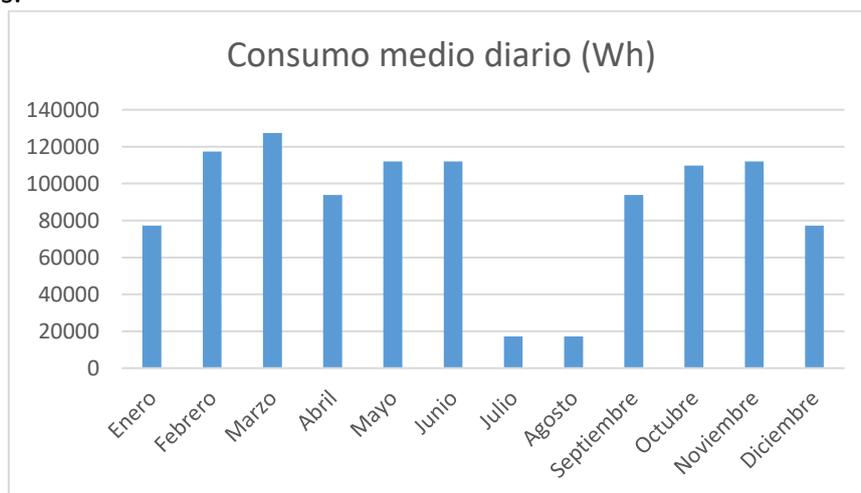


Figura 14. Consumos medios diarios mensuales.

En la figura 15 puede verse el perfil horario de consumo considerado para una semana típica de actividad escolar, de lunes a domingo.

El consumo medio diario anual del colegio considerado es de 89 kWh.

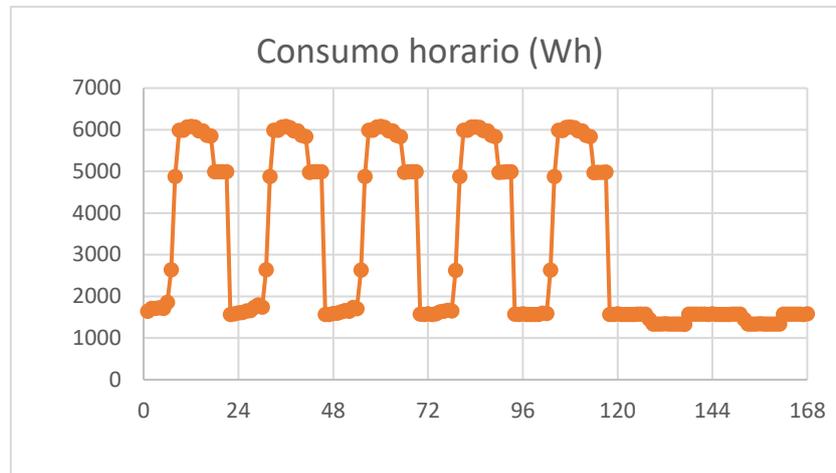


Figura 15. Perfiles horarios de consumo.

Resultados

De acuerdo a estos perfiles de consumo y la metodología presentada, se ha calculado la energía producida por un sistema fotovoltaico capaz de cubrir esta demanda para cada una de las localidades estudiadas. El análisis de sensibilidad del autoconsumo y de la autosuficiencia en función de la potencia pico para todas las localidades estudiadas ofrece los siguientes resultados:

Potencia pico (kW)	Autoconsumo				
	Zona I La Coruña	Zona II Burgos	Zona III Lérida	Zona IV Málaga	Zona V Sta. Cruz de Tenerife
5	85,3	81,4	83,2	83,0	84,1
10	74,0	69,6	72,4	71,7	72,8
15	66,1	62,2	65,0	64,1	64,1
20	58,0	54,1	56,1	55,1	54,3
25	50,9	46,9	48,5	47,2	46,2
30	45,1	41,1	42,4	40,8	39,9
35	40,2	36,5	37,5	35,9	35,0
40	36,2	32,8	33,5	31,9	31,2
45	32,9	29,7	30,2	28,7	28,1
50	30,1	27,2	27,5	26,1	25,6

Tabla XV. Valores de autoconsumo obtenidos para las distintas ciudades en función de la potencia pico instalada.

Autosuficiencia					
Potencia pico (kW)	Zona I La Coruña	Zona II Burgos	Zona III Lérida	Zona IV Málaga	Zona V Sta. Cruz de Tenerife
5	17,2	18,4	19,6	21,2	21,8
10	29,9	31,4	34,1	36,7	37,8
15	40,1	42,1	45,9	49,2	49,9
20	46,9	48,8	52,8	56,4	56,3
25	51,5	53,0	57,1	60,4	59,9
30	54,6	55,7	59,9	62,7	62,0
35	56,9	57,7	61,7	64,2	63,6
40	58,6	59,2	63,0	65,4	64,7
45	59,9	60,5	64,0	66,2	65,7
50	60,9	61,5	64,7	66,8	66,4

Tabla XVI. Valores de autosuficiencia obtenidos para las distintas ciudades en función de la potencia pico instalada.

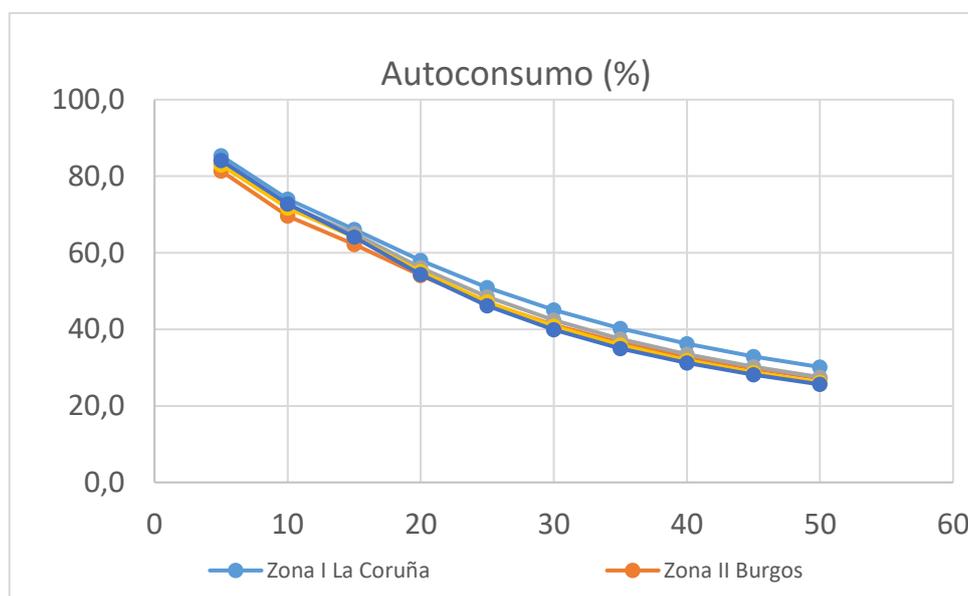


Figura 16. Representación de los valores de autoconsumo obtenidos para las distintas ciudades en función de la potencia pico instalada.

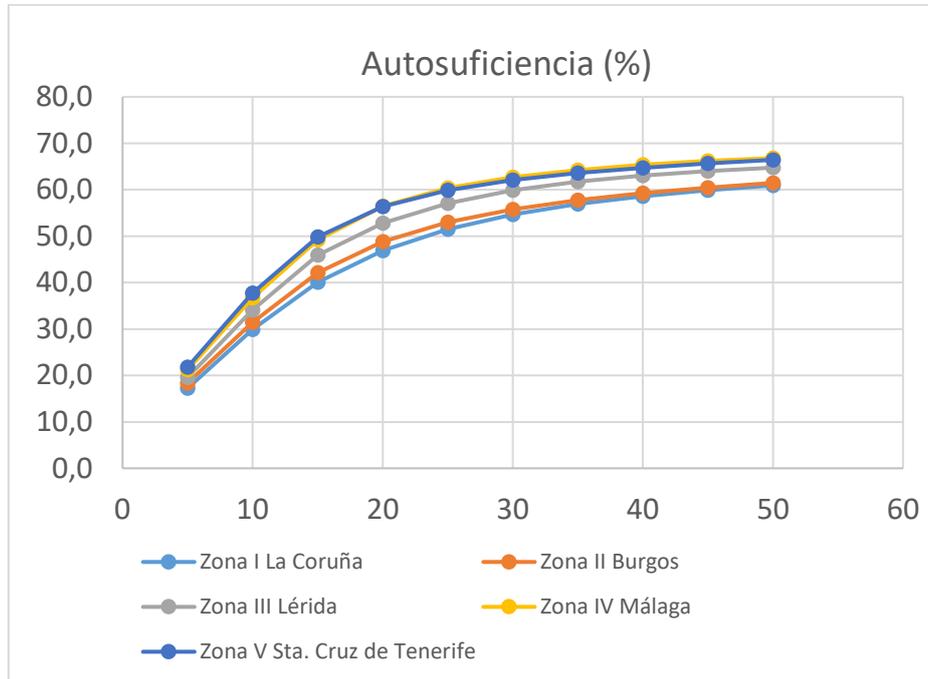


Figura 17. Representación de los valores de autosuficiencia obtenidos para las distintas ciudades en función de la potencia pico instalada.

Discusión de los resultados y conclusiones

De acuerdo con las curvas presentadas anteriormente, podemos ver que la energía autoconsumida en esta aplicación alcanza valores del 80% para instalaciones de poca potencia (5 kWp) disminuyendo según aumenta potencia pico instalada, no apreciándose grandes diferencias entre los resultados obtenidos para las distintas localidades. Estos valores nos hablan de que la mayoría de los consumos se producen durante las horas diurnas. Los valores de autosuficiencia siguen la tendencia contraria, con valores del 20% para baja potencia instalada y que van aumentando según aumenta la potencia pico, alcanzándose valores por encima del 60 %. Se observan mayores porcentajes de autosuficiencia en las localidades con mayor insolación. Sin embargo, las formas de estas curvas nos indican que pasar de una potencia instalada de 25 a 50 kWp solamente aumentamos la autosuficiencia del sistema (ahorro eléctrico) entre un 10 y un 15% dependiendo de la localidad.

Si representamos conjuntamente para cada localidad las dos curvas (autoconsumo y autosuficiencia) observamos que el punto de corte de las mismas es distinto para cada localidad. Es decir, necesitamos mayor potencia pico instalada para suministrar el mismo consumo en aquellas localidades con menor insolación. En La Coruña es necesaria una instalación de 25 kWp y se consiguen ahorros del 50 %, mientras que en

Málaga o Tenerife se consigue generar la misma energía con sistemas FV de 20 kWp alcanzándose valores de autosuficiencia próximos al 60%.

En las tablas y gráficas siguientes se presentan estos resultados. En las tablas se ha marcado la zona donde se produce el punto de corte entre las dos curvas.

Potencia pico (kW)	Zona I	Zona I	Zona IV	Zona IV
	Autocons.	Autosuf.	Autocons.	Autosuf.
5	85,3	17,2	83,0	21,2
10	74,0	29,9	71,7	36,7
15	66,1	40,1	64,1	49,2
20	58,0	46,9	55,1	56,4
25	50,9	51,5	47,2	60,4
30	45,1	54,6	40,8	62,7
35	40,2	56,9	35,9	64,2
40	36,2	58,6	31,9	65,4
45	32,9	59,9	28,7	66,2
50	30,1	60,9	26,1	66,8

Tabla XVII. Valores comparativos de autoconsumo y autosuficiencia para La Coruña y Málaga en función de la potencia pico instalada.

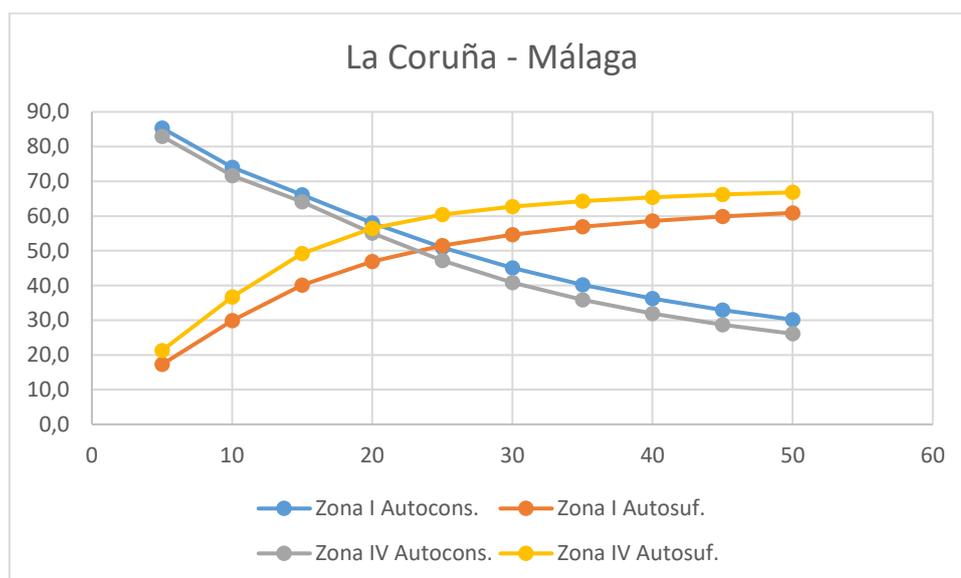


Figura 18. Representación de los valores de autoconsumo y autosuficiencia para La Coruña y Málaga en función de la potencia pico instalada.

Potencia pico (kW)	Zona II Autocons.	Zona II Autosuf.	Zona III Autocons.	Zona III Autosuf.
5	81,4	18,4	83,2	19,6
10	69,6	31,4	72,4	34,1
15	62,2	42,1	65,0	45,9
20	54,1	48,8	56,1	52,8
25	46,9	53,0	48,5	57,1
30	41,1	55,7	42,4	59,9
35	36,5	57,7	37,5	61,7
40	32,8	59,2	33,5	63,0
45	29,7	60,5	30,2	64,0
50	27,2	61,5	27,5	64,7

Tabla XVIII. Valores comparativos de autoconsumo y autosuficiencia para Burgos y Lérida en función de la potencia pico instalada.

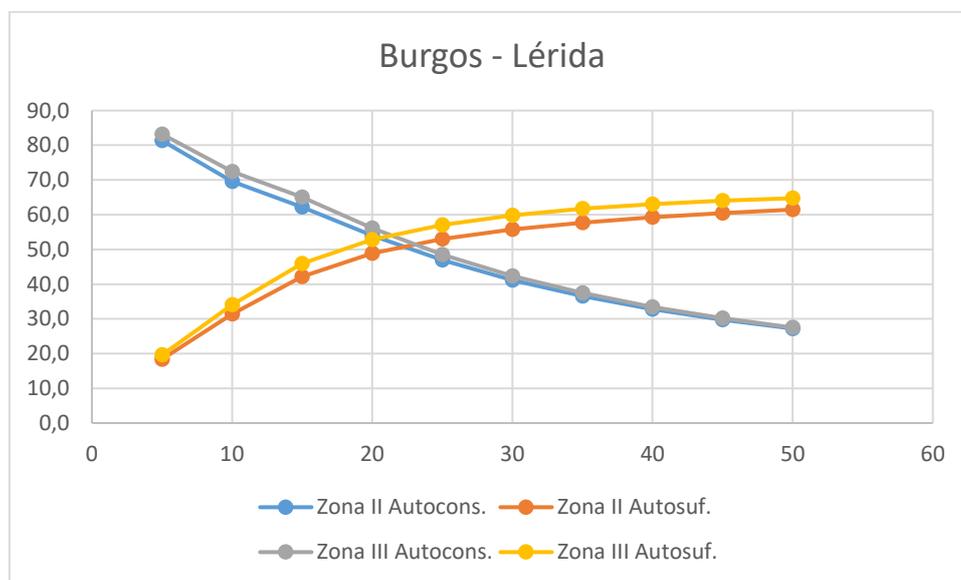


Figura 19. Representación de los valores de autoconsumo y autosuficiencia para Burgos y Lérida en función de la potencia pico instalada.

Potencia pico (kW)	Zona IV Autocons.	Zona IV Autosuf.	Zona V Autocons.	Zona V Autosuf.
5	83,0	21,2	84,1	21,8
10	71,7	36,7	72,8	37,8
15	64,1	49,2	64,1	49,9
20	55,1	56,4	54,3	56,3
25	47,2	60,4	46,2	59,9
30	40,8	62,7	39,9	62,0
35	35,9	64,2	35,0	63,6
40	31,9	65,4	31,2	64,7
45	28,7	66,2	28,1	65,7
50	26,1	66,8	25,6	66,4

Tabla XIX. Valores comparativos de autoconsumo y autosuficiencia para Málaga y Santa Cruz de Tenerife en función de la potencia pico instalada.

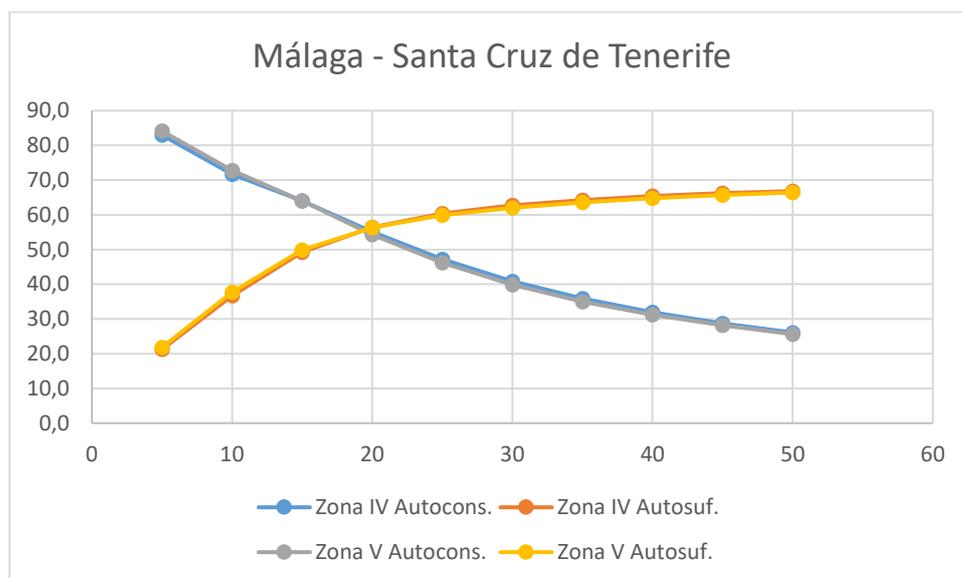


Figura 19. Representación de los valores de autoconsumo y autosuficiencia para Málaga y Santa Cruz de Tenerife en función de la potencia pico instalada.

Los resultados presentados muestran que el consumo de los centros escolares puede ser cubierto parcialmente con instalaciones fotovoltaicas de autoconsumo. La autosuficiencia (ahorro energético) que se alcanza en estos sistemas es mayor del 50%. En estas condiciones más del 50 % de la producción fotovoltaica es aprovechada directamente por el consumidor, mientras que el resto se envía a la red.

Cabe destacar también, como las curvas de autosuficiencia presentan una variación lineal con la potencia pico instalada, cuando la potencia instalada es pequeña. Estas

curvas saturan rápidamente para potencias superiores a 20 kWp. Teniendo en cuenta la legislación española y la tendencia que presentan las curvas de autosuficiencia presentadas, podemos afirmar que para estas aplicaciones una potencia instalada fotovoltaica mayor de 20 kWp no es aconsejable. Con esta potencia instalada el sistema genera anualmente la misma cantidad de energía que el consumo del centro escolar, con lo que además con estos valores, el centro escolar sería un centro de consumo eléctrico nulo. Aunque el consumo en los centros escolares es fundamentalmente diurno, el alto número de días sin actividad escolar condiciona los resultados obtenidos.

Aplicación 3. Sistema fotovoltaico de autoconsumo para un supermercado.

Caracterización del consumo

Al no haber encontrado datos disponibles de consumo eléctrico de estos centros en España, hemos utilizado la base de datos de los perfiles de consumo de establecimientos comerciales, empleados en el estudio *Nationwide Analysis of U. S. Commercial Building Solar Photovoltaic (PV) Breakeven Conditions* (Davidson, Gagnon, Denholm, y Margolis, 2015), el cual analiza el umbral de rentabilidad de las instalaciones de energía solar fotovoltaica en establecimientos comerciales de Estados Unidos. Dicho estudio está elaborado por el NREL. En esta base de datos pueden verse perfiles horarios de carga eléctrica de 16 tipos de establecimientos.

En el caso de supermercados, hemos tenido que adaptar estos consumos para considerar un supermercado medio con consumos medios diarios anuales de 2200 Kwh día. En la figura 20 puede verse el valor medio de los consumos diarios mensuales considerados. Como puede verse, los consumos eléctricos de los supermercados están caracterizados por un alto valor de consumo nocturno, debido a las máquinas de refrigeración de productos y aire acondicionado que permanece conectado las 24 horas del día. Por la misma razón el consumo durante los meses de invierno es mucho mayor que en los meses de verano. Además, también hay consumos importantes los días en los que el supermercado no está abierto al público.

En la figura 21 puede verse el consumo típico de un día de un supermercado. Como puede observarse. Hay un consumo constante durante las horas nocturnas del orden de 1/3 del consumo máximo que se produce a las horas centrales del día.

A modo de ejemplo, en la figura 22 puede verse el consumo considerado del supermercado durante el mes de noviembre.

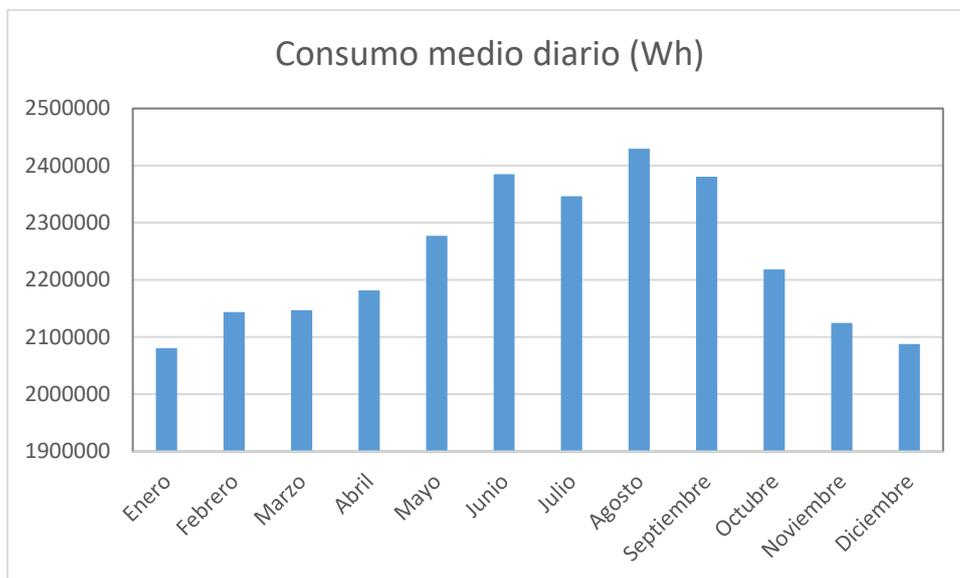


Figura 20. Consumo medio diario mensual de un supermercado.

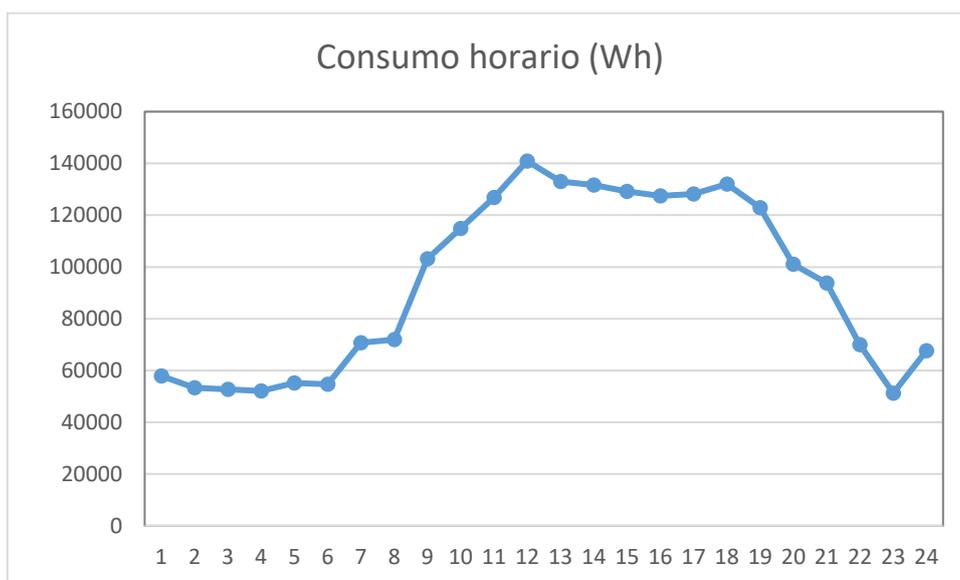


Figura 21. Consumo horario típico de un supermercado.

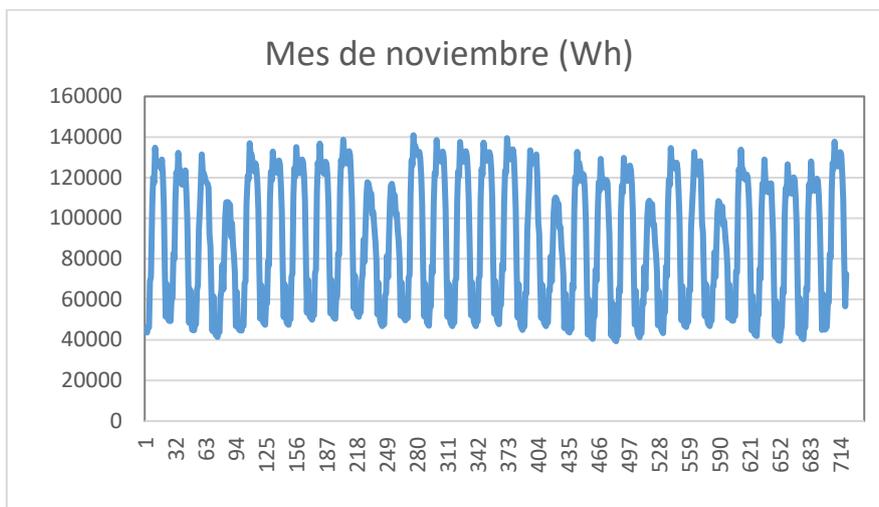


Figura 22. Consumo horario del supermercado para el mes de noviembre.

Resultados

De acuerdo con estos perfiles de consumo y la metodología presentada, se ha calculado la energía producida por un sistema fotovoltaico capaz de cubrir esta demanda para cada una de las localidades estudiadas. El análisis de sensibilidad del autoconsumo y de la autosuficiencia en función de la potencia pico para todas las localidades estudiadas ofrece los siguientes resultados:

Potencia pico (kW)	Autoconsumo				
	Zona I La Coruña	Zona II Burgos	Zona III Lérida	Zona IV Málaga	Zona V Sta. Cruz de Tenerife
50	100,0	99,8	100,0	99,9	100,0
100	100,0	99,8	100,0	99,9	100,0
150	100,0	99,7	100,0	99,9	99,9
200	97,9	97,3	98,1	98,0	97,0
250	91,5	89,7	90,8	90,2	88,7
300	84,1	81,3	81,9	80,7	79,5
350	77,0	73,6	74,0	72,3	71,5
400	70,7	67,0	67,3	65,1	64,6
450	65,2	61,4	61,6	59,2	58,7
500	60,4	56,6	56,6	54,3	53,8
550	56,2	52,5	52,4	50,1	49,6
600	52,5	48,9	48,8	46,5	46,0
650	49,3	45,7	45,6	43,3	42,8
700	46,4	43,0	42,7	40,6	40,1

Tabla XIX. Valores de autoconsumo obtenidos para las distintas ciudades en función de la potencia pico instalada

Autosuficiencia					
Potencia pico (kW)	Zona I La Coruña	Zona II Burgos	Zona III Lérida	Zona IV Málaga	Zona V Sta. Cruz de Tenerife
50	8,0	9,0	9,3	10,2	10,3
100	16,0	17,9	18,7	20,3	20,6
150	24,1	26,9	28,0	30,5	30,9
200	31,4	34,9	36,7	39,9	40,0
250	36,7	40,3	42,4	45,9	45,6
300	40,4	43,8	45,9	49,3	49,1
350	43,2	46,3	48,4	51,5	51,5
400	45,4	48,2	50,3	53,1	53,2
450	47,1	49,7	51,7	54,3	54,4
500	48,5	50,8	52,9	55,2	55,4
550	49,6	51,8	53,9	56,1	56,1
600	50,6	52,7	54,6	56,8	56,8
650	51,4	53,4	55,3	57,4	57,3
700	52,0	54,0	55,9	57,8	57,8

Tabla XXI. Valores de autosuficiencia obtenidos para las distintas ciudades en función de la potencia pico instalada.

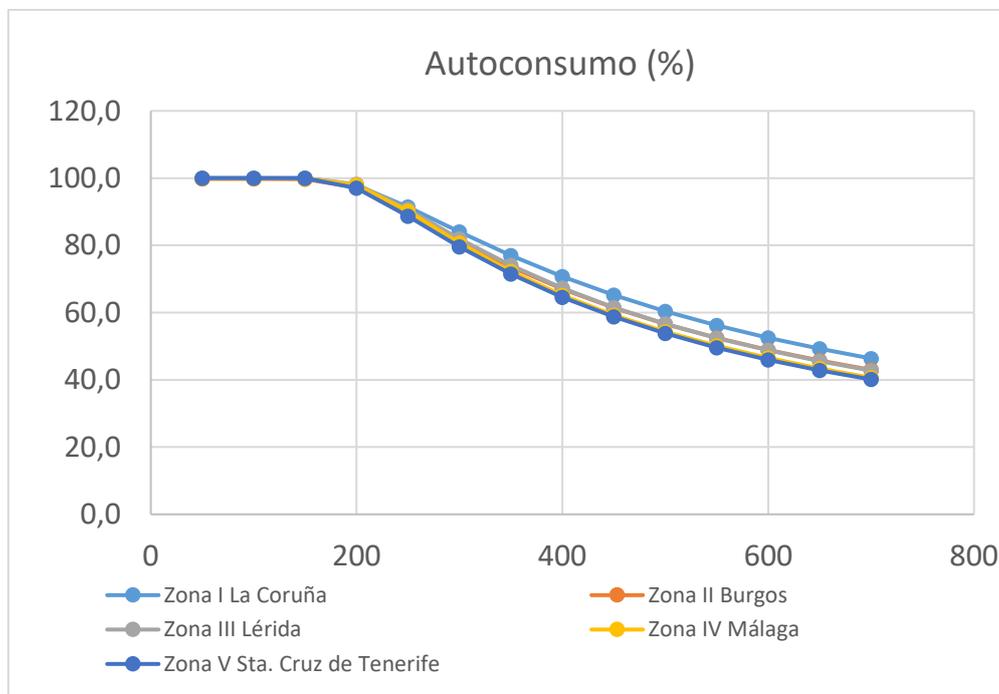


Figura 23. Representación de los valores de autoconsumo obtenidos para las distintas ciudades en función de la potencia pico instalada.

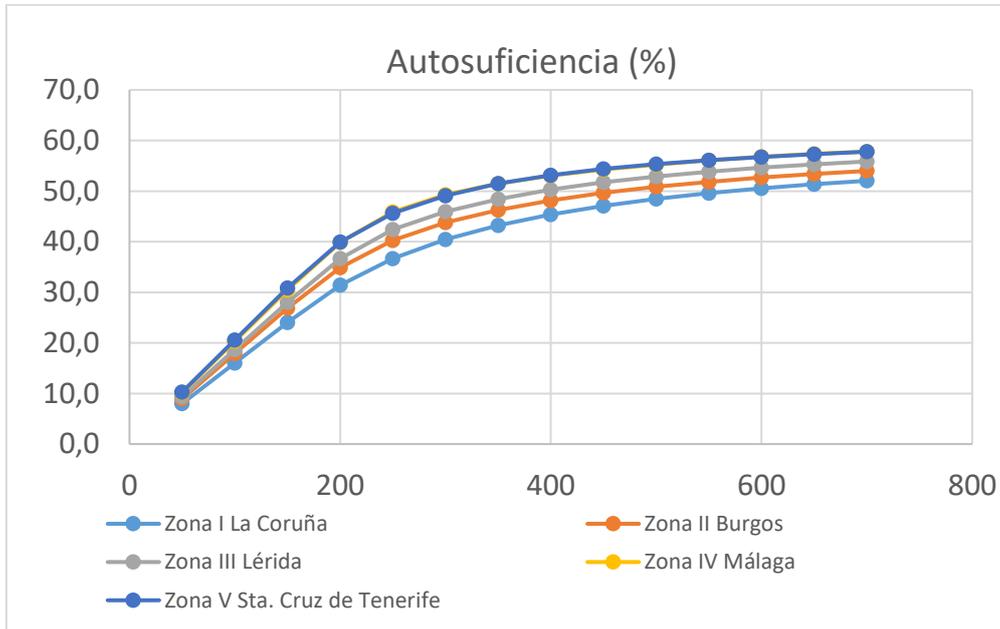


Figura 24. Representación de los valores de autosuficiencia obtenidos para las distintas ciudades en función de la potencia pico instalada.

Discusión de los resultados y conclusiones

De acuerdo con las curvas presentadas anteriormente, podemos ver que la energía autoconsumida en esta aplicación alcanza valores del 100% hasta potencias instaladas de 200 kWp, disminuyendo según aumenta potencia pico instalada, alcanzándose valores próximos al 40 % para sistemas de 700 kWp instalados.

Los valores de autosuficiencia siguen la tendencia contraria. Presentan una variación lineal hasta potencias de 200 kW, con valores de autosuficiencia entre el 30 y el 40 %, Siendo estos valores más altos en las ciudades que tienen mayores horas de Sol. Cabe destacar que estas curvas saturan rápidamente, por lo que pasar de 200 a 400 kWp instalados, sólo mejora la autosuficiencia en un 15% y si vamos de 400 a 600 kWp sólo aumentamos en menos 5 %. Teniendo en cuenta que hasta 200 kWp se consume en el supermercado toda la energía eléctrica producida, este valor de la potencia pico instalada, es sin duda, la opción más rentable en las condiciones de regulación de mercado eléctrico actuales en España.

En las tablas y gráficas siguientes se presentan estos resultados. En las tablas se ha marcado la zona donde se produce el punto de corte entre las dos curvas.

Potencia pico (kW)	Zona I	Zona I	Zona IV	Zona IV
	Autocons.	Autosuf.	Autocons.	Autosuf.
50	100,0	8,0	99,9	10,2
100	100,0	16,0	99,9	20,3
150	100,0	24,1	99,9	30,5
200	97,9	31,4	98,0	39,9
250	91,5	36,7	90,2	45,9
300	84,1	40,4	80,7	49,3
350	77,0	43,2	72,3	51,5
400	70,7	45,4	65,1	53,1
450	65,2	47,1	59,2	54,3
500	60,4	48,5	54,3	55,2
550	56,2	49,6	50,1	56,1
600	52,5	50,6	46,5	56,8
650	49,3	51,4	43,3	57,4
700	46,4	52,0	40,6	57,8

Tabla XXII. Valores comparativos de autoconsumo y autosuficiencia para La Coruña y Málaga en función de la potencia pico instalada.

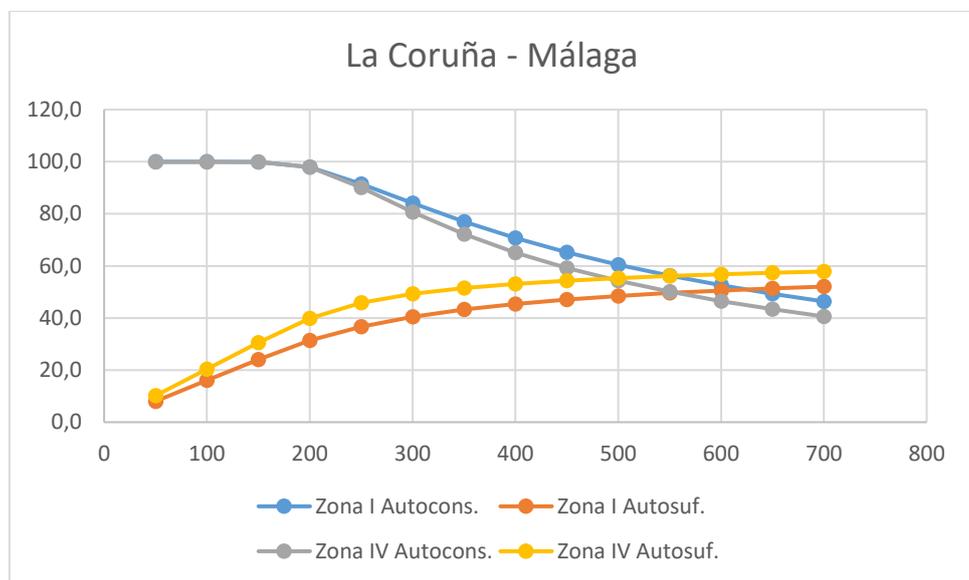


Figura 25. Representación de los valores de autoconsumo y autosuficiencia para La Coruña y Málaga en función de la potencia pico instalada.

Potencia pico (kW)	Zona II Autocons.	Zona II Autosuf.	Zona III Autocons.	Zona III Autosuf.
50	99,8	9,0	100,0	9,3
100	99,8	17,9	100,0	18,7
150	99,7	26,9	100,0	28,0
200	97,3	34,9	98,1	36,7
250	89,7	40,3	90,8	42,4
300	81,3	43,8	81,9	45,9
350	73,6	46,3	74,0	48,4
400	67,0	48,2	67,3	50,3
450	61,4	49,7	61,6	51,7
500	56,6	50,8	56,6	52,9
550	52,5	51,8	52,4	53,9
600	48,9	52,7	48,8	54,6
650	45,7	53,4	45,6	55,3
700	43,0	54,0	42,7	55,9

Tabla XXIII. Valores comparativos de autoconsumo y autosuficiencia para Burgos y Lérida en función de la potencia pico instalada.

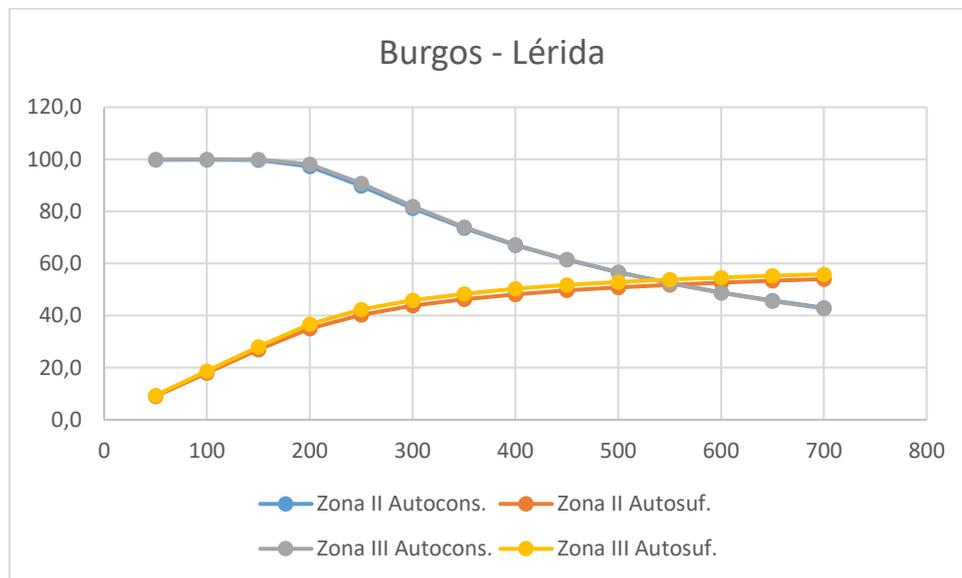


Figura 26. Representación de los valores de autoconsumo y autosuficiencia para Burgos y Lérida en función de la potencia pico instalada.

Potencia pico (kW)	Zona IV Autocons.	Zona IV Autosuf.	Zona V Autocons.	Zona V Autosuf.
50	99,9	10,2	100,0	10,3
100	99,9	20,3	100,0	20,6
150	99,9	30,5	99,9	30,9
200	98,0	39,9	97,0	40,0
250	90,2	45,9	88,7	45,6
300	80,7	49,3	79,5	49,1
350	72,3	51,5	71,5	51,5
400	65,1	53,1	64,6	53,2
450	59,2	54,3	58,7	54,4
500	54,3	55,2	53,8	55,4
550	50,1	56,1	49,6	56,1
600	46,5	56,8	46,0	56,8
650	43,3	57,4	42,8	57,3
700	40,6	57,8	40,1	57,8

Tabla XXIV. Valores comparativos de autoconsumo y autosuficiencia para Málaga y Santa Cruz de Tenerife en función de la potencia pico instalada.

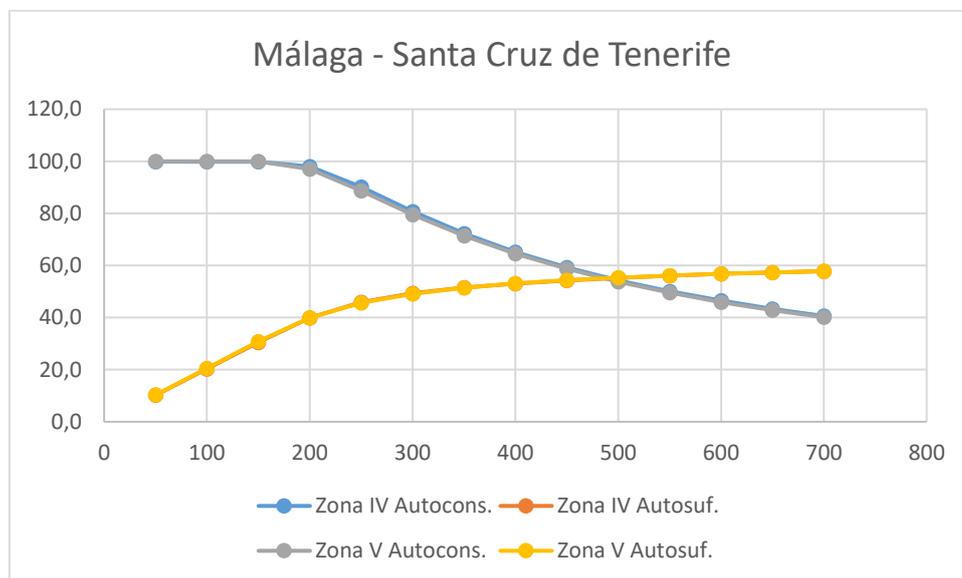


Figura 27. Representación de los valores de autoconsumo y autosuficiencia para Málaga y Santa Cruz de Tenerife en función de la potencia pico instalada.

Si representamos conjuntamente para cada localidad las dos curvas (autoconsumo y autosuficiencia) observamos que el punto de corte de las mismas es distinto para cada localidad. Es decir, necesitamos mayor potencia pico instalada para suministrar el

mismo consumo en aquellas localidades con menor insolación. En La Coruña es necesaria una instalación de 600 kWp para generar toda la energía que consume el supermercado y se consiguen ahorros del 50 %, mientras que en Málaga o Tenerife se consigue generar la misma energía con sistemas FV de 500 kWp alcanzándose valores de autosuficiencia próximos al 55%. En Burgos y Lérida son necesarios 550 kWp alcanzándose valores del 52% de autosuficiencia.

Para la situación óptima de potencia pico instalada de 200 kWp en La Coruña se obtiene valores de autosuficiencia del 31,4%, en Burgos 34,9%, en Lérida 36,7%, en Málaga 39,9% y en Tenerife 40%, con valores de autoconsumos muy próximos al 100%.

Conclusiones generales del estudio: Futuras líneas de investigación

En este trabajo se ha abordado el estudio de las posibilidades de las instalaciones fotovoltaicas de autoconsumo para diversas aplicaciones, así como un estudio comparativo de las mismas en función de las diferentes zonas climáticas de la geografía española. De los resultados obtenidos se destacan las siguientes conclusiones:

Las instalaciones de autoconsumo tienen un inmenso potencial en todos los puntos de la geografía española, no sólo en aplicaciones domésticas, sino en amplios sectores comerciales, donde se pueden alcanzar niveles de autosuficiencia importantes para todas las aplicaciones estudiadas.

Un sencillo dimensionado del sistema fotovoltaico, nos permite calcular la energía generada necesaria para cubrir un consumo determinado. Sin embargo, sólo un estudio detallado del balance energético horario de estos consumos nos permite calcular los niveles de autosuficiencia y autoconsumo para cada una de las aplicaciones estudiadas. En todos los casos, estos sistemas intercambian energía con la red, y si se quieren obtener niveles de autosuficiencia importantes, también será importante, en general la energía enviada a la red. En este sentido, la rentabilidad final de estos sistemas pasa por recibir un precio por la energía enviada a la red y que no ponga en riesgo, la rentabilidad de estos sistemas.

Si nos fijamos en los resultados obtenidos en este estudio, en los supermercados, debido a su perfil de consumo, deberían ser las instalaciones más rentables, ya que se pueden obtener valores altos de ahorro energético 40 % aprovechando además toda la energía producida por el sistema fotovoltaico.

Los centros escolares, también pueden beneficiarse de las ventajas de los sistemas fotovoltaicos de autoconsumo, ya que se pueden obtener ahorros energéticos superiores al 50% con valores de autoconsumo del 50 %. Estos resultados se ven fuertemente condicionados por el calendario escolar, ya que, en los meses de mayor insolación, verano, los centros escolares permanecen cerrados y sus consumos energéticos en estos meses es mucho más bajo.

Por último, en las aplicaciones fotovoltaicas para talleres mecánicos se alcanzan valores de autosuficiencia mayores del 30% pero siempre con valores de autoconsumo menores del 40 %. La particular forma de las curvas de consumo y el alto número de días en los que no se trabaja en el taller, condicionan, en este caso, los resultados obtenidos. Si atendemos a las diferencias encontradas para las distintas localidades, vemos que la los resultados obtenidos son acordes con la distribución de la radiación solar, siendo la

ciudad de la Coruña es la que necesita más potencia pico para alcanzar los mismos resultados que en las otras. En Burgos y Lérida se obtienen resultados similares, lo mismo que en Málaga y Santa Cruz de Tenerife.

Teniendo en cuenta esta variabilidad meteorológica, podemos afirmar que en toda la geografía española se pueden alcanzar, para todas las aplicaciones estudiadas, niveles de ahorro energético con sistemas de autoconsumo muy elevados.

Por último destacar, que cómo la potencia pico de un sistema fotovoltaico es directamente proporcional al consumo total de la aplicación. Estos resultados son extrapolables a diferentes tamaños de sistemas, siempre y cuando se mantenga la forma de los perfiles horarios de consumo establecidos para cada aplicación.

Los trabajos de investigación futuros deberían centrarse en las siguientes líneas:

- Estudio de la rentabilidad económica de estos sistemas en función de las tarifas eléctricas.
- Estudio de sistemas de autoconsumo con batería de acumulación: tamaño óptimo del sistema de acumulación en función del perfil de carga.
- Estudio comparativo de rentabilidad económica de sistemas fotovoltaicos de autoconsumo con y sin acumulación.

Bibliografía

- [1] J. Remund y S. Müller, *Meteonorm: Handbook Part I: Software Version 7.1*, Switzerland: METEOTEST, 2014.
- [2] «Meteonorm Handbook part II: Theory Version 7.2» [En línea]. Available: http://www.meteonorm.com/images/uploads/downloads/mn72_theory7.2.pdf. [Último acceso: 04 septiembre 2017].
- [3] J. Zorrilla-Casanova, M. Piliouguine y et al., «Analysis of dust losses in photovoltaic modules» de Worl Renewable Congress, Sweden, 2011.
- [4] N. Martín y J. M. Ruiz, «Annual angular reflection losses in PV modules» *Progress in Photovoltaics, Research and Applications*, nº 13, pp. 75-84, 2005.
- [5] N. Martin y R. J. M., «Calculation of the PV modules angular losses under field conditions by means of an analytical model» *Solar Energy Materials & Solar Cells*, nº 70, pp. 25-38, 2001.
- [6] E. Lorenzo, *Radiación solar y dispositivos fotovoltaicos*. Vol. II, Sevilla: Progensa, 2006.
- [7] «OpenEI. U.S. Department of Energy. Open Data Catalog. Commercial and Residential Hourly Load Profiles for all TMY3 Locations in the United States» [En línea]. Available: <http://en.openei.org/doe-opendata/dataset/commercial-and-residential-hourly-load-profiles-for-all-tmy3-locations-in-the-united-states>. [Último acceso: 02 09 2017].
- [8] A. Ayala Gilardón, L. Mora López y M. Sidrach de Cardona, «Design and Evaluation of Self-consumption Photovoltaic Installation» *Energy and Sustainable Development Symposium*, 2015.
- [9] R. Luthander, J. Widén, D. Nilsson y J. Palm, «Photovoltaic self-consumtion in buildings: A review» *Applied Energy*, pp. 80-94, 2015.
- [10] Castañer, L., y Silvestre, S. (2002). *Modelling Photovoltaic Systems using PSpice*. Wiley.
- [11] Davidson, C., Gagnon, P., Denholm, P., y Margolis, R. (2015). *Nationwide Analysis of U. S. Commercial Building Solar Photovoltaic (PV) Breakeven Conditions*.
- [12] Hendron, R., y Engebrecht, C. (2010). *Building America House Simulation Protocols*. ONU, PNUMA, PNUD, OMM, OMS, UNTAR, y UNFCCC. (2004).
- [13] Schmela, M. (2017). *Global Market Outlook for Solar Power / 2017-2021*.
- [14] *Visión de la Tecnología Fotovoltaica en España*. (2006). Plataforma Tecnológica Fotovoltaica Española.
- [15] Wenham, S., Green, M., Watt, M., y Corkish, R. (2007). *Applied Photovoltaics* (2.a ed.). Centre for Advanced Silicon Photovoltaics and Photonics.