

Generación distribuida y autoconsumo fotovoltaico. Potencial energético para las industrias de las almazaras en España

Distributed generation and photovoltaic self-consumption. Energy potential for the olive mill industries in Spain

Antonio-Javier Martínez-Calahorro, Gabino Jiménez-Castillo, Catalina Rus-Casas y Francisco-José Muñoz-Rodríguez
 Universidad de Jaén (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/9748>

1. INTRODUCCIÓN

La generación distribuida se puede definir como el conjunto de sistemas de generación eléctrica que se encuentran conectados dentro de las redes de distribución [1]. Estos sistemas se caracterizan, principalmente, por una potencia de generación inferior a 50 MW, por su conexión a la red eléctrica de distribución, por no existir una planificación centralizada y por su ubicación cercana a los puntos de consumo.

Las energías renovables presentan un papel esencial en el desarrollo de la generación distribuida. Estas han ido aumentando paulatinamente su contribución en el consumo de energía primaria mundial, representando en 2018 el 10,8% del total, lo que las convierte en la cuarta fuente de consumo de energía primaria en el mundo. Es importante destacar que el 84,7% de energía primaria consumida en el mundo aún proviene de combustibles fósiles [2].

Dentro de las energías renovables destaca la energía solar fotovoltaica. Dado que España presenta niveles de irradiación solar muy elevados, existe un gran potencial para el desarrollo de esta tecnología, en concreto, del autoconsumo fotovoltaico. En este sentido, la generación distribuida basada en sistemas de autoconsumo fotovoltaico (SAF) puede representar una alternativa, como fuente de energía principal, en las industrias que presenten un consumo energético que se desarrolle, en gran medida, durante

las horas de sol, figura 1(b). Entre los elementos principales de un SAF destaca el generador fotovoltaico con su potencia pico, siendo ésta la potencia máxima que puede entregar el generador fotovoltaico en condiciones estándar (STC): irradiancia de 1000 W/m² y temperatura de célula de 25°C [3] y el inversor que transforma la corriente continua generada por los módulos en corriente alterna para hacer frente al consumo o inyectarla a la red, figura 1(a). Otros elementos como el cableado, reguladores, apartamiento y contadores hacen que la instalación

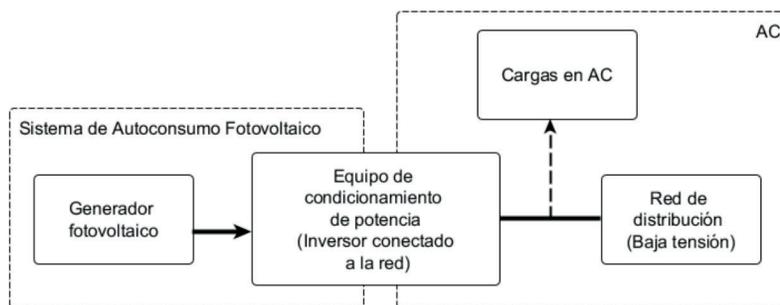
funcione correctamente y cumpla los requisitos de seguridad de este tipo de instalaciones.

Para analizar los SAF se utilizan los índices de autoconsumo (IAC) y autosuficiencia (IAS). El IAC se puede definir como el cociente entre la energía fotovoltaica autoconsumida, $E_{PV,con}$ y la energía fotovoltaica generada, $E_{PV,gen}$ (ecuación 1). El IAC indica el nivel de aprovechamiento de la energía fotovoltaica generada. Por otro lado, el IAS proporciona el porcentaje del consumo, E_L , que es cubierto a partir de la energía fotovoltaica generada (ecuación 2) [4]. τ corresponde al periodo de análisis.

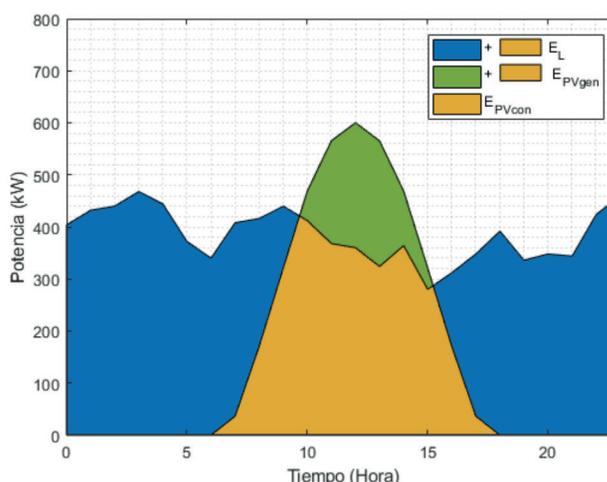
$$\varphi_{sc,\tau} = \frac{E_{PV,con,\tau}}{E_{PV,gen,\tau}} \quad (1)$$

$$\varphi_{ss,\tau} = \frac{E_{PV,con,\tau}}{E_{L,\tau}} \quad (2)$$

Este artículo trata de analizar, a través de los mencionados índices, como los SAF pueden resultar una alternativa energética



(a)



(b)

Figura 1: (a) Diagrama de bloques de un SAF. (b) Perfil diario de consumo y generación fotovoltaica

interesante para las almazaras, así como para cualquier industria que presente un perfil de consumo similar. Para abordar este estudio, el artículo se ha estructurado en diferentes secciones. En la sección 2 se estudiará el perfil de consumo de las almazaras y se presentará el método de análisis basado en el trazado de las curvas de autosuficiencia y autoconsumo para un rango determinado de potencias de generador fotovoltaico. En la sección 3 se mostrarán los resultados del estudio y la discusión de los mismos. Por último, en la sección 4 se presentarán las conclusiones.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. LAS ALMAZARAS EN ESPAÑA Y SU CONSUMO ENERGÉTICO

El sector industrial agroalimentario del aceite de oliva tiene una gran importancia económica, social y ambiental en España, donde existen más de 1.700 almazaras repartidas por la geografía española y en las que se produce, según la Agencia de Información y Control Alimentarios, más de 1.000.000 de toneladas anuales de aceite de oliva.

Una almazara está formada por un conjunto de equipos e instalaciones de consumo industriales: líneas transportadoras, lavadoras, molinos, batidoras, prensas, bombas de trasiegos,..., que conforman una serie de procesos industriales para la elaboración de aceite de oliva, donde destacan la recepción de la aceituna, lavado, molienda, batido, separación por fases, centrifugación, almacenamiento, deshuese y otros consumos auxiliares. Las almazaras se clasifican en tres grupos en función de su producción de aceite de oliva y consumo eléctrico, Tabla 1 [5].

Para ilustrar el consumo eléctrico de este tipo de industria se ha monitorizado durante un año la potencia consumida por una almazara. Los datos monitorizados presentan un tiempo de almacenamiento o registro de 15 minutos, que puede ser un valor adecuado para abordar este análisis [6]. Si bien estos datos corresponden a una almazara, los perfiles de consumo de la mayor parte de las almazaras son similares variando solo la potencia de la misma que viene dada por el tamaño de la almazara.

Atendiendo al consumo eléctrico hay dos periodos característicos: campaña de recogida de aceitunas y fuera de campaña, siendo el consumo eléctrico apreciablemente mayor en el primer periodo. En la figura 2(a) se muestra el perfil de potencia eléctrica consumida (kW) a lo largo de un día de campaña. Se aprecia como la potencia, aparte de ser elevada, suele presentar poca variabilidad a lo largo del día. Este aspecto es interesante, como se estudiará en el siguiente apartado, ya que permite alcanzar un buen acoplamiento entre las curvas de generación fotovoltaica y el consumo eléctrico de la almazara durante las horas de sol. Por otro lado, para el periodo fuera de campaña se puede distinguir a su vez tres tipos de perfiles: laborable, laborable con envasado y no laborable. Fuera de campaña, el consumo es relativamente pequeño destacando la falta de actividad en la planta de producción. Los consumos se deben exclusivamente a la actividad propia de oficina en los días laborables (iluminación, SAI, climatización, ordenadores,...), figura 2(b). Así mismo, el consumo es prácticamente residual los fines de semana ya que no hay actividad ni de producción ni de oficina y solo debe

hacer frente al alumbrado y SAI, figura 2(c). Por último, no todas las almazaras envasan aceite, en este caso sí, por lo que hay que destacar un consumo en este sentido que existe tanto en el periodo de campaña como fuera de ésta, figura 2(d). Hay que destacar que se produce durante las horas de sol, aspecto que también favorece la utilización de los SAF.

2.2. ESTUDIO DE CASO DE SAF EN ALMAZARA

Se va a estudiar el caso de una almazara ubicada en la provincia de Jaén, Andalucía, para analizar las oportunidades energéticas que se obtienen con la instalación de un SAF en este tipo de industria. El estudio se ha planteado con SAF directo sin almacenamiento ya que la legislación española ofrece la opción de venta de energía para los excedentes de generación. De esta manera, la almazara pasa de ser consumidor, a ser también productor, dando lugar a un nuevo concepto de la generación distribuida, *prosumidor*. Por otro lado, aunque los dispositivos de almacenamiento están experimentado un gran crecimiento, aún los costes no son competitivos. La almazara objeto de estudio, según la

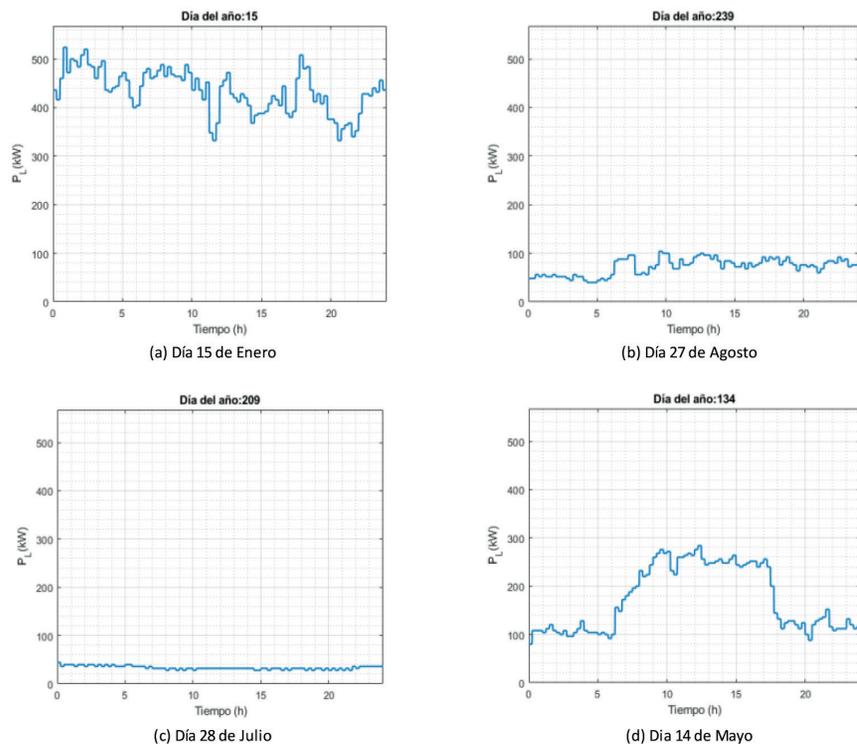


Figura 2: Diferentes tipos de perfiles de potencia eléctrica consumida (W) de la almazara objeto de estudio obtenidos a partir de datos monitorizados: (a) Día de campaña (b) Día laborable fuera de campaña (c) Día fuera de campaña y fin de semana (d) Día laborable fuera de campaña con proceso de envasado

Categorías	Producción de aceite de oliva (t)	Consumo medio de electricidad (MWh)
Pequeño	<1000	92
Medio	1000 <producción<5000	435
Grande	> 5000	923

Tabla 1 Clasificación de las almazaras según la producción final de aceite de oliva

clasificación de la tabla 1, es de categoría *grande*, presentando un consumo anual de 1.406.436 kWh. Los datos de consumo de la almazara han sido recogidos durante 1 año completo, a través de un sistema de monitorización que ha medido la energía activa y reactiva con un intervalo de registro de 15 minutos. El periodo de medición fue de abril 2018 a marzo 2019 [7].

Para evaluar el potencial de los SAF se van a obtener las curvas de autoconsumo y autosuficiencia para potencias nominales del generador fotovoltaico, P_0 , hasta 2 MW (i.e. se van a calcular los IAC e IAS con un rango de potencia nominal de 0,01 a 2000 kWp con un incremento de 10 kWp). Este valor de 2 MW se justifica para poder apreciar en toda su extensión, así como las diferentes regiones características de las curvas de autosuficiencia y autoconsumo.

Para el cálculo de la potencia del generador, P_{GFV} , se han utilizado los datos de irradiancia de un año meteorológico típico, aportados por la base de datos de la Agencia Andaluza de la Energía, y a partir del Factor de Rendimiento (PR), ecuación (3) [3]. Este método ha sido utilizado en diferentes trabajos [8,9].

$$P_{GFV} = P_0 \times PR \times \frac{G_I}{G_{STC}} \quad (3)$$

Donde G_I es la irradiancia incidente y G_{STC} la irradiancia en STC. El PR utilizado en este caso es de 0,75, valor ampliamente aceptado en este tipo de instalaciones en España [10]. El ángulo de inclinación considerado en el estudio es de 30° y pretende maximizar la generación durante todo el año [7].

Para el cálculo de los IAC e IAS a través de las ecuaciones 1 y 2 es necesario conocer la energía fotovoltaica generada, $E_{PV,gen}$, ecuación (4), la energía consumida por la instalación E_L , ecuación (5) así como la energía fotovoltaica autoconsumida, $E_{PV,con}$, ecuaciones (6 y 7) [8,9].

$$E_{PV,gen,\tau} = \sum_k P_{PV,gen,k,\tau_k} \times \tau_k \quad (4)$$

$$E_{L,\tau} = \sum_k P_{L,k,\tau_k} \times \tau_k \quad (5)$$

$$E_{PV,con,\tau} = \sum_k P_{PV,con,k,\tau_k} \times \tau_k \quad (6)$$

Donde τ se corresponde con el periodo de estudio (días, periodo de campaña, periodo fuera de campaña y anual), τ_k es

$$E_{PV,con,k,\tau_k} = \begin{cases} E_{L,k,\tau_k} & \text{si } E_{PV,gen,k,\tau_k} \geq E_{L,k,\tau_k} \\ E_{PV,gen,k,\tau_k} & \text{si } E_{PV,gen,k,\tau_k} < E_{L,k,\tau_k} \end{cases} \quad (7)$$

la duración del intervalo de registro y k es el número de intervalos en el periodo de estudio [3].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Inicialmente, se realiza un estudio de los perfiles diarios de consumo y generación fotovoltaicos para diferentes potencias de generación, que permitirá ilustrar como se acoplan ambos tipos de perfiles de potencia. A continuación, se van a considerar periodos de análisis mayores para analizar el potencial de los SAF como alternativa energética en este tipo de industria.

Se observa como para un día cualquiera de campaña, aún con potencias muy altas de generación (e.g. 900 kWp), no se llega a cubrir las necesidades de consumo durante las horas de generación de la almazara analizada, tal y como muestra la figura 3(a). Esto ocurre por la potencia de la almazara que según la tabla 1, es tipo *grande*. Así mismo, se observa cómo, dada la poca variabilidad del consumo, se puede alcanzar un elevado nivel de

aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica a pesar de las altas potencias de generación. Esto pone de manifiesto la gran sintonía entre los perfiles diarios de generación y de consumo de la almazara.

Con los perfiles obtenidos, figura 3(a), se pueden obtener $E_{PV,con}$, así como IAC e IAS, para un τ diario y un rango de potencias hasta 2 MWp, figura 3(b). Se muestra como en el periodo de campaña y hasta 800 kWp, el IAC es 1, lo que implica que toda la energía generada es consumida por la almazara. Por otro lado, el IAS aumenta linealmente hasta ese valor al aprovecharse prácticamente toda la energía generada. A partir de ese punto, el IAS aumenta con una pendiente que va decreciendo al aumentar la potencia nominal de generación. Debido al gran consumo que presenta esta almazara y que está distribuido prácticamente por igual durante todo el día, el IAS para autoconsumo directo está siempre por debajo del 40%. Si bien, se pueden alcanzar estos niveles de autosuficiencia, el tamaño del generador fotovoltaico

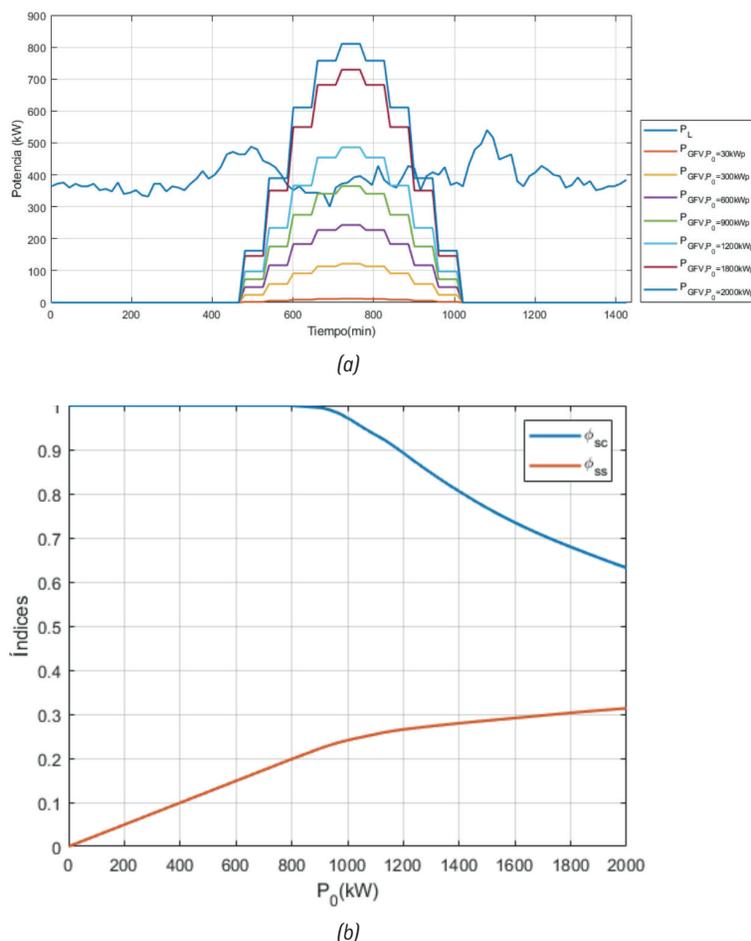


Figura 3: Día de campaña (3 de enero) (a) Perfiles diarios de carga y de generación fotovoltaica para diferentes potencias del generador fotovoltaico (b) Curvas diarias de autoconsumo y autosuficiencia

asociado puede ser inviable en la práctica. Además, hay que considerar que esta situación no se produce fuera de campaña.

Si se realiza el mismo análisis en un día fuera del periodo de campaña de recogida de aceitunas (3 de julio), se observa que $E_{PV,con}$ en función de la

generada por el SAF.

$$ZEB \Rightarrow E_{L,\tau} = E_{PV,gen,\tau} \quad (8)$$

Si fuera posible aprovechar toda la energía generada, utilizando diferentes estrategias como gestión de cargas o uso

valores ligeramente superiores al 60%.

Una vez realizado un análisis diario, se va a desarrollar un análisis para dos periodos: campaña y fuera de ella, pero ahora suponiendo un τ de varios meses para cada periodo: campaña (diciembre, enero, febrero y marzo) y fuera de campaña (abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre octubre y noviembre). Si se analizan los IAC e IAS para el periodo de campaña, se observa que se llega al punto ZEB con potencias muy altas de generación fotovoltaica (i.e por encima de 1900 MW), figura 5(a), pues el consumo de la almazara es muy elevado en este periodo. Destaca como se consiguen IAC muy altos, e IAS relevantes (e.g para una potencia de

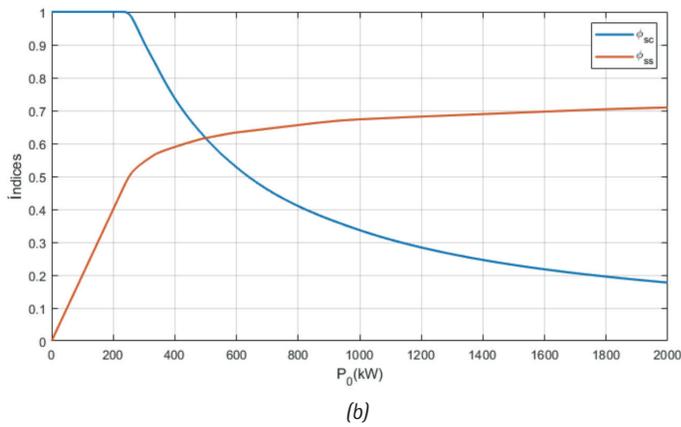
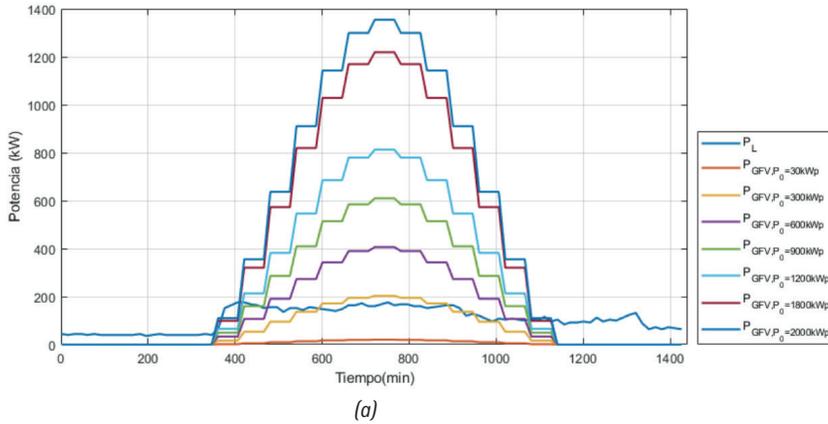


Figura 4: Día fuera de campaña (3 de julio) (a) Perfiles diarios de carga y de generación fotovoltaica para diferentes potencias del generador fotovoltaico (b) ϕ_{sc} e ϕ_{ss}

potencia pico del generador fotovoltaico es capaz de cubrir gran parte del consumo de manera instantánea, y el resto de energía se vierte a la red, obteniendo, en el caso de la legislación española (RD-Ley 15/2018), una remuneración económica por la misma, Figura 4(a). En este caso, si interesa vender el excedente, pues al tener una potencia pico ajustada a las necesidades de campaña, los excesos de energía permiten en este periodo mejorar el retorno de la inversión realizada.

La figura 4(b) muestra un punto de intersección de los IAC y IAS (en torno a los 500 kWp). Este es el punto ZEB (Zero Energy Building) y se caracteriza porque se igualan los dos índices. A partir de las ecuaciones (1) y (2) se llega a la conclusión de que la energía consumida en la almazara es igual a la energía

de sistemas de acumulación, se podría hacer frente a todo el consumo. En la figura 3(b) no se aprecia el punto ZEB ya que en el periodo de campaña de recogida de aceitunas el consumo de energía de la almazara es muy elevado y sería necesario un generador fotovoltaico excesivamente grande para que la generación del mismo igualara al consumo. Dado que fuera del periodo de campaña, el consumo energético es muy pequeño comparado con el consumo en periodo de campaña, el SAF tiene unos IAC pequeños, ya que poca energía fotovoltaica se autoconsume pues la gran mayoría de energía generada se inyecta a la red. Respecto al IAS, tal y como muestra la figura 4(b), éste crece linealmente hasta los 250 kWp. A partir de ahí, la pendiente va decreciendo y la curva se va haciendo asintótica, alcanzando

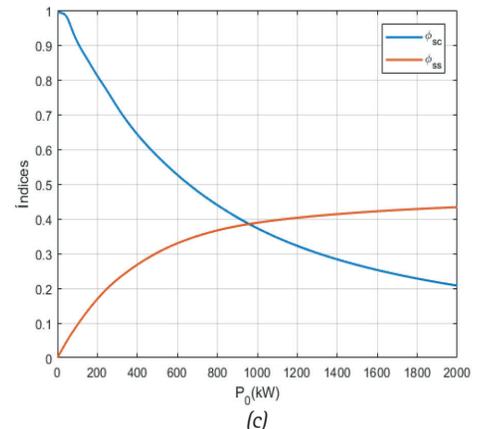
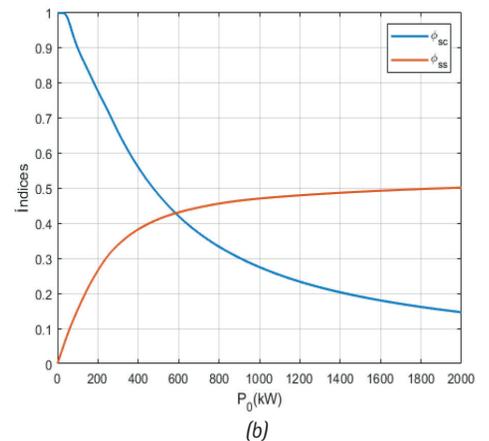
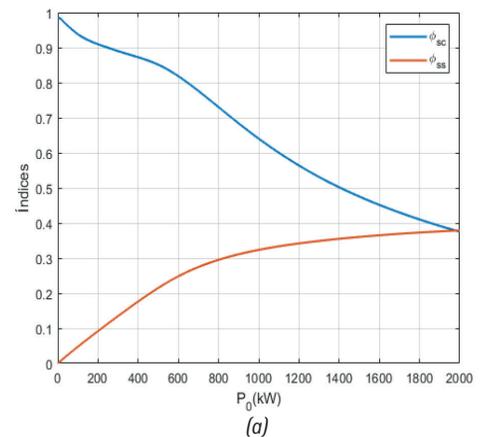


Figura 5: IAC e IAS para (a) Periodo de campaña (b) Periodo fuera de campaña (c) Periodo anual

800 kWp el IAS y el IAC alcanzan valores de 30 y 70%, respectivamente). Hay que destacar que en este periodo el IAS se encontrará siempre por debajo del 40% ya que las almazaras también operan fuera de las horas de generación solar.

Para el periodo fuera de campaña, al bajar el consumo de la almazara el punto ZEB se encuentra en torno a los 600 kW, figura 5(b). En este periodo se consiguen IAC más bajos e IAS más altos al reducirse notablemente el consumo. A partir de 400 kWp, la curva de autosuficiencia empieza a hacerse asintótica.

Por último, el análisis de los IAC e IAS para el periodo anual, figura 5(c), muestra que el punto ZEB se alcanza para potencias de generación ligeramente inferiores a 1 MWp. En este caso, se observan IAC superiores al 75% para rangos de potencias hasta los 250 kW donde el IAS presenta un comportamiento casi lineal y puede alcanzar el 20%. Para esta almazara, ésta sería la zona donde habría que realizar el dimensionado del generador fotovoltaico abordando un estudio económico de rentabilidad, así como de competitividad en costes. Asimismo, puede no tener sentido aumentar, en este caso, la potencia del generador fotovoltaico ya que el incremento en el IAS no es tan relevante al mismo tiempo que disminuye notablemente el IAC, lo que podría implicar el aumento del coste de la energía fotovoltaica generada haciendo que no sea competitiva. Hay que destacar la importancia de estas curvas que, a partir de datos reales de consumo, pueden ayudar a definir el potencial de los SAF para cubrir el consumo eléctrico.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo muestra a través de las curvas de autosuficiencia y autoconsumo el potencial de los SAF, como ejemplo de generación distribuida, en las empresas del sector agroalimentario de las almazaras. El método de análisis es fácilmente extrapolable no solo a cualquier almazara sino a cualquier industria siempre y cuando se dispongan de los perfiles de consumo.

El estudio muestra que en época de campaña el perfil de consumo es elevado y con poca variabilidad con lo que se puede alcanzar un buen acoplamiento entre los perfiles consumo y de generación fotovoltaico durante las horas de sol. El incremento del IAS es proporcional al tamaño del generador fotovoltaico al mismo tiempo que el IAC roza el 90%. Para la almazara considerada el

comportamiento es lineal hasta los 400 kWp y hasta ese valor el IAC se acerca al 89%, mientras que el IAS alcanza el 19%. Si se analiza en el periodo fuera de campaña, el consumo de la almazara, aunque sigue siendo prácticamente constante, disminuye ostensiblemente. Esto permite que un generador de 200 kWp proporcione IAS e IAC del 28% y el 76%, respectivamente. Por último, y para la almazara analizada, y desde una perspectiva anual, que es la que valida el potencial de esta tecnología como alternativa energética en este tipo de instalaciones, se pueden obtener niveles de aprovechamiento de la energía fotovoltaica generada de un 80% y un IAS cercano al 20%, considerando un generador fotovoltaico de 200 kWp. Dado que los perfiles de consumo de una almazara, independientemente de su potencia de consumo, se caracterizan, generalmente, por poseer un perfil de consumo con poca variabilidad, los resultados aquí obtenidos son fácilmente trasladables a cualquier almazara, así como a cualquier tipo de industria que presente un perfil de consumo constante o con pocas variaciones. Este hecho pone de manifiesto la gran sintonía entre los SAF y este tipo de industria donde se pueden alcanzar IAS relevantes, así como un gran nivel de aprovechamiento de la energía fotovoltaica generada.

El marco regulatorio del autoconsumo en España (RD 900/2015 y el RD 244/2019,) ofrece una gran oportunidad al sector industrial para disponer de sus propios sistemas de generación distribuida a través de SAF. Estos últimos convertirían a las industrias en productores, además de consumidores: cuando la generación superara al consumo, los excedentes podrían inyectarse a la red. En ese sentido, se podrían reducir sus costes energéticos y aumentar su competitividad. Los siguientes trabajos estarán enfocados en esa línea: estudiar la rentabilidad y la competitividad en costes con respecto a la red eléctrica de este tipo de instalaciones en el sector industrial.

REFERENCIAS

- [1] Sarasa-Maestro CJ, Dufo-López R, Bernal-Agustín JL (2016). Analysis of Photovoltaic Self-Consumption Systems. *Energies* 2016, 9 (9), 681. DOI: <https://doi.org/10.3390/en9090681>
- [2] APPA (2018). Asociación de Empresas de Energías Renovables. Disponible en: <https://www.appa.es/energias-renovables/renovables-en-el-mundo-y-en-europa/> (Consultado el 17/01/2020)

- [3] IEC 61724-1 Edition 1.0 2017-03 Photovoltaic system performance – Part 1: Monitoring IEC; Edition 1.; IEC publications: Geneva, 2017; ISBN 9782832239889.
- [4] Luthander R, Widén J, Nilsson D, Palm J (2015). Photovoltaic self-consumption in buildings: A review. *Applied energy*, 2015. Elsevier. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.028>
- [5] FAECA (2011). Federación Andaluza de Empresas Cooperativas Agrarias. Manual de Ahorro y Eficiencia Energética del Sector. Almazaras. Disponible en: <http://www.agro-alimentarias.coop/ficheros/doc/03198.pdf> (Consultado el 20/11/2019)
- [6] Jiménez-Castillo, G.; Tina, G.-M.; Muñoz-Rodríguez, F.J.; Rus-Casas, C. Smart meters for the evaluation of self-consumption in zero energy buildings. In *Proceedings of the 2019 10th International Renewable Energy Congress (IREC)*; 2019; pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/IREC.2019.8754609>
- [7] Jiménez-Castillo, G.; Muñoz-Rodríguez, F.J.; Martínez-Calahorra, A.J.; Tina, G.M.; Rus-Casas, C. Impacts of Array Orientation and Tilt Angles for Photovoltaic Self-Sufficiency and Self-Consumption Indices in Olive Mills in Spain. *Electronics* 2020, 9, 348; DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics9020348>
- [8] Talavera, D.L.; Muñoz-Rodríguez, F.J.; Jiménez-Castillo, G.; Rus-Casas, C. A new approach to sizing the photovoltaic generator in self-consumption systems based on cost-competitiveness, maximizing direct self-consumption. *Renew. energy* 2019, 130, 1021–1035. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.088>
- [9] Jiménez-Castillo, G.; Muñoz-Rodríguez, F.J.; Rus-Casas, C.; Talavera, D.L. A new approach based on economic profitability to sizing the photovoltaic generator in self-consumption systems without storage. *Renew. Energy* 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.086>
- [10] Rus-Casas, C.; Aguilar, J.D.; Rodrigo, P.; Almonacid, F.; Pérez-Higueras, P.J. Classification of methods for annual energy harvesting calculations of photovoltaic generators. *Energy Convers. Manag.* 2014, 78, 527–536. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.11.006>