



Universidad de Jaén

Escuela de Doctorado

UNIVERSIDAD DE JAÉN

ESCUELA POLITÉCNICA

SUPERIOR DE JAÉN

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA

ELECTRÓNICA Y AUTOMÁTICA

TESIS DOCTORAL

**APORTACIÓN A LA GENERACIÓN
DISTRIBUIDA. ANÁLISIS DEL AUTOCONSUMO
FOTOVOLTAICO EN EL SECTOR INDUSTRIAL**

PRESENTADA POR:

Antonio Javier Martínez Calahorro

DIRIGIDA POR:

Dr. D. Francisco José Muñoz Rodríguez

Dra. D^a. Catalina Rus Casas

JAÉN, 29 DE JUNIO DE 2021

ISBN

UNIVERSIDAD DE JAÉN



Universidad de Jaén

Escuela de Doctorado

TESIS DOCTORAL

APORTACIÓN A LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA. ANÁLISIS DEL AUTOCONSUMO FOTOVOLTAICO EN EL SECTOR INDUSTRIAL

AUTOR

Antonio Javier Martínez Calahorro

DIRECTORES

Dr. D. Francisco José Muñoz Rodríguez

Dra. D^a. Catalina Rus Casas

TUTORES

Dra. D^a. Catalina Rus Casas

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
ELECTRÓNICA Y AUTOMÁTICA
JAÉN, 29 DE JUNIO DE 2021

UNIVERSIDAD DE JAÉN



Universidad de Jaén

Escuela de Doctorado

TESIS DOCTORAL

APORTACIÓN A LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA. ANÁLISIS DEL AUTOCONSUMO FOTOVOLTAICO EN EL SECTOR INDUSTRIAL

TRIBUNAL EVALUADOR

Presidente: Inmaculada Plaza García

Secretario: Gabino Almonacid Puche

Vocal: Pablo Ángel Valera Martínez

Suplente: Carlos Tomás Medrano Sánchez

Suplente: Eloísa Torres Jiménez

UNIVERSIDAD DE JAÉN

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y
AUTOMÁTICA

TESIS DOCTORAL

La memoria titulada: "**APORTACIÓN A LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA. ANÁLISIS DEL AUTOCONSUMO FOTOVOLTAICO EN EL SECTOR INDUSTRIAL**" ha sido desarrollada dentro del Departamento de Ingeniería Electrónica y Automática de la Universidad de Jaén, a través de un convenio de colaboración Universidad Empresa, para la obtención de la mención Doctorado Industrial y presentada por el aspirante a Doctor Industrial en Energías Renovables, D. Antonio Javier Martínez Calahorro, bajo la dirección del Dr. D. Francisco José Muñoz Rodríguez y de la Dra. D^a. Catalina Rus Casas.

Jaén, 29 de Junio de 2021

El doctorando



Fdo. Antonio Javier Martínez Calahorro

Los directores de la tesis

Fdo. Dr. D. Francisco José Muñoz Rodríguez

Fdo. Dra. D^a. Catalina Rus Casas

La presente tesis doctoral ha sido realizada con la financiación parcial de la Universidad de Jaén. Línea de actuación: Fomento y divulgación de la transferencia, enmarcada en el Objetivo 1 “Apoyo a las actividades de transferencia del conocimiento”, del Plan de Apoyo a la Transferencia del Conocimiento, el Emprendimiento y la Empleabilidad (2017), para la contratación de doctorandos industriales.

*a mi esposa e hijos
a mis padres y hermana
a mi familia y amigos*

*La vida no es fácil, para ninguno de
nosotros. Pero... ¡Qué importa! Hay que
perseverar y, sobre todo, tener confianza en
uno mismo. Hay que sentirse dotado para
realizar alguna cosa y esa cosa hay que
alcanzarla, cueste lo que cueste.*

Marie Curie

Agradecimientos

Recuerdo con anhelo, cuando comencé a plantearme realizar la tesis doctoral, parece que fue ayer, sin embargo, han pasado más de cuatro años. Por aquel entonces, por edad y responsabilidades que va uno adquiriendo conforme va avanzando la vida, tenía serias dudas acerca de dar el paso de matricularme en la tesis o no. Pues aquí estoy, a pocos días de depositar la tesis, escribiendo los agradecimientos.

Estos cuatro años han sido muy duros, pues compaginar la vida familiar, con la profesional y con el añadido de la tesis doctoral, no ha sido nada fácil, ni para mí, ni para mi mujer e hijos. Son muchas horas de dedicación a la tesis, que no nos engañemos, que de algún sitio tienen que salir, pues el día tiene 24 horas y por mucho que queramos, no da para más. Han sido muchas horas de biblioteca, de sala de doctorandos, de domingos sin rutas de senderismo con la familia, de faltas a quedadas con los amigos, en definitiva, de mucho esfuerzo y sacrificio, pero ese es el precio a pagar para conseguir los objetivos que uno se propone, y el mío era sacarme el doctorado.

Tener de directores y tutores de tesis a Catalina Rus y a Francisco José Muñoz, ha sido un lujo y fundamental para poder llegar hasta el final. Han sido compañeros de camino, siempre dirigiendo y marcando el tempo. Tengo que agradecerles su compromiso, dedicación, comprensión, esfuerzo y amistad. Gracias Cati, por ser un pilar fundamental en la consecución de esta tesis, siempre has tenido tiempo para escuchar mis frustraciones en este largo camino, que tú y yo sabemos que las he tenido, y por sentir que estabas ahí. Paco, gracias por tu capacidad de dirección, tu capacidad de investigación y por la paciencia que has tenido que tener conmigo, pues sé que no he sido un doctorando fácil, bueno, vamos a dejarlo al uso, tú me entiendes. Gracias de nuevo a los dos por vuestra profesionalidad, compromiso, dirección y seguimiento.

A mis compañeros de tesis, Gabino Jiménez y Antonio Partal. A ti Gabino, decirte que has sido como mi hermano mayor de tesis, siempre he recurrido a ti para que me mostrases el camino a seguir, te he sentido cerca, te acompañe en su defensa de tesis, y nunca, nunca, me he sentido solo en este camino. Eres una persona excepcional y un científico de raza, lo llevas en la sangre. A Antonio Partal, gracias por tu apoyo en el final de este recorrido, hemos tenido poco tiempo para trabajar juntos, pero se te nota madera científica, trabaja duro y pronto estarás tu escribiendo los agradecimientos de tu tesis.

A mi mujer, Maricarmen, que te puedo decir, solo tengo palabras de agradecimiento, gracias por aguantarme, por compartir tu vida conmigo, son muchas horas fuera de casa, viajando, trabajando, estudiando, gracias por llevar a mi lado más de 20 años y sentir tu apoyo en este nuevo reto. De nuevo gracias a ti, a Andrea y Lucas por vuestro apoyo incondicional.

A mis padres, por enseñarme valores para afrontar la vida, a ser valiente, a no esconderme ante la adversidad, a que detrás del esfuerzo siempre está la recompensa, a que hay que ser agradecido, gracias mamá y papá por estar a mi lado siempre.

A mi hermana, familia y amigos, gracias a todos.

Resumen

La tendencia de la demanda energética actual es creciente y continúa ligada al aumento del desarrollo y de la población. En este sentido es clave, conseguir que las fuentes de energía sean renovables y contribuyan a un entorno sostenible. Con la producción de energía mediante energías renovables además se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero y se minimizan daños al medioambiente, que son objetivos prioritarios en las agendas de los gobiernos de la Unión Europea. En ese sentido, esta tesis se enmarca en la aplicación de la energía solar fotovoltaica en el sector industrial que constituye el primer consumidor de energía mundial. Así mismo, es un sector estratégico en el que se apoya la economía mundial. Además, hay que tener en cuenta que el coste energético de la industria representa uno de los mayores costes a los que tiene que hacer frente este tipo de actividad empresarial.

En este nuevo escenario se debe impulsar que las industrias utilicen energías renovables, de manera local, contribuyendo además a una planificación de energía distribuida. Poseer una industria sostenible basada en energías renovables es garantía de competitividad y avance sostenible en el tiempo. Esto repercutirá directamente no solo en el desarrollo tecnológico sino también en el mercado laboral para hacer frente a todos los retos, presentes y futuros, a los que la sociedad se enfrenta, y donde la pronta reacción es clave.

Este reto tecnológico hace que la empresa Grupo Marwen Calsan, involucrada en plantear soluciones de eficiencia energética e incorporación de energías renovables en la industria, junto con la colaboración de la Universidad de Jaén, pretenda desarrollar soluciones técnicas para el autoconsumo fotovoltaico en el sector industrial que incorporen investigación avanzada e innovación en el marco de un doctorado industrial en este campo. Todas las soluciones específicas que se den a este tipo de retos sientan precedentes y avanzan para un desarrollo de una industria más sostenible y competitiva. Conocer el contexto industrial y sus particularidades es clave para poder tomar decisiones, dimensionar adecuadamente e instalar sistemas fotovoltaicos de autoconsumo que den soluciones *ad hoc* para cada perfil de consumo eléctrico que presente la industria considerada, y que ayuden al nuevo modelo energético distribuido.

El desarrollo de la tesis ha permitido obtener perfiles de consumo eléctrico durante un año de diferentes industrias con el objetivo de avanzar en el desarrollo de la energía solar fotovoltaica y en el modelo distribuido en el sector industrial. En este sentido, se ha desarrollado un modelo de análisis de la idoneidad del autoconsumo fotovoltaico que se adapte a las características del perfil de consumo eléctrico de las industrias, que es muy diferente al característico del sector residencial. Se ha presentado un nuevo parámetro de análisis: índice de autosuficiencia en horas solares. Así mismo, se ha estudiado el nivel de acoplamiento de los perfiles de consumo eléctrico de dos tipos de industrias: almazaras e industrias del sector del frío, con los perfiles de generación proporcionados por sistemas fotovoltaicos de diferentes potencias.

En el caso de las almazaras se ha analizado el nivel de acoplamiento de las curvas de consumo y generación en dos épocas bien diferenciadas: época de cosecha y fuera de ella, ya que ambas presentan un perfil de consumo bien diferenciado. Se ha demostrado que, desde un punto de vista energético, los sistemas de autoconsumo fotovoltaico sin almacenamiento pueden ser adecuados para las almazaras, con un alto índice de autoconsumo ($> 80\%$), lo que proporciona una alta capacidad de emparejamiento entre los perfiles de carga y consumo, junto con un índice de autosuficiencia que va del 20 al 30% para el período de recolección de la aceituna. Además, se ha estudiado como los ángulos de inclinación y la orientación del generador fotovoltaico influyen en los índices de autosuficiencia y autoconsumo.

Tal como se ha estudiado para las almazaras, también se ha analizado el potencial que presentan las instalaciones fotovoltaicas de autoconsumo para el sector del frío industrial. En este tipo de industrias hay que tener en cuenta su especificidad energética, en particular, éstas presentan un perfil con poca variabilidad y con un consumo basal muy destacado durante todo el año. Se ha demostrado que en este tipo de industria los índices de autoconsumo pueden ser superiores al 90% al mismo tiempo que se alcanzan niveles de autosuficiencia del 40 al 50%. Además, se presenta un nuevo índice de autosuficiencia por horas de sol, $\phi_{SS,SH}$. Este índice evalúa el rendimiento del sistema de autoconsumo fotovoltaico frente al consumo solo durante las horas de sol, por lo que puede complementar el índice de autosuficiencia y mejorar el análisis de este tipo de sistemas en el sector industrial. También hay que destacar que el método desarrollado, y que se ha aplicado a los dos tipos de industrias anteriormente mencionados, es fácilmente extrapolable a cualquier tipo de industria. Por último, es fundamental disponer de datos reales de perfiles de consumo, ya que esto último permite garantizar unos resultados útiles y ajustados a la realidad de un sector industrial que no solo presenta un gran gasto energético, sino que se caracteriza por perfiles de consumo muy característicos y variados.

La generación distribuida, cercana, con sus muchas ventajas, haciendo uso de la energía solar fotovoltaica, gracias a su fácil integración en los diferentes puntos, versatilidad y distribución, debe ser ampliamente desarrollada para obtener soluciones fiables y adaptadas a la idiosincrasia del sector industrial, tan particular y tan importante para el desarrollo económico local y mundial, y todo ello enmarcado dentro de las disciplinas del emprendimiento, como forma generadora de riqueza y desarrollo innovador para toda la sociedad.

Abstract

The current energy demand trend is growing and continues to be linked to the increase in development and population. In this sense, it is crucial to ensure that energy sources are renewable and contribute to a sustainable environment. Thanks to the production of energy through renewable energies, greenhouse gas emissions and damage to the environment are minimized, which are priority objectives on the agendas of the European Union governments. In this sense, this thesis is part of the application of photovoltaic solar energy in the industrial sector that constitutes the world's leading energy consumer. Likewise, it is a strategic sector on which the world economy relies. In addition, it must be taken into account that the energy cost of the industry represents one of the highest costs that this type of business activity has to face.

In this new scenario, it is necessary to encourage industries to use renewable energy locally, also contributing to distributed energy planning. Having a sustainable industry based on renewable energies is a guarantee of competitiveness and sustainable progress over time. This will have a direct impact not only on technological development but also on the labor market to face all the challenges, present and future, that society faces, and where prompt reaction is key.

This technological challenge makes the Marwen Calsan Group company, involved in proposing energy efficiency solutions and incorporation of renewable energies in the industry, together with the collaboration of the University of Jaén, intends to develop technical solutions for photovoltaic self-consumption in the industrial sector that incorporate advanced research and innovation within the framework of an industrial doctorate in this field. All the specific solutions that are given to these types of challenges set precedents and advance for the development of a more sustainable and competitive industry. Knowing the industrial context and its particularities is key to being able to make decisions, properly dimension and install self-consumption photovoltaic systems that provide ad hoc solutions for each profile of electricity consumption presented by the industry considered, and that help the new distributed energy model.

The development of the thesis has allowed obtaining profiles of electricity consumption during a year of different industries with the aim of advancing in the development of photovoltaic solar energy and in the distributed model in the industrial sector. In this sense, an analysis model of the suitability of photovoltaic self-consumption has been developed that adapts to the characteristics of the electricity consumption profile of industries, which is very different from that characteristic of the residential sector. A new analysis parameter has been presented: self-sufficiency index in solar hours. Likewise, the level of coupling of the electricity consumption profiles of two types of industries has been studied: oil mills and industries in the cold sector, with the generation profiles provided by photovoltaic systems of different powers.

In the case of oil mills, the level of coupling of the consumption and generation curves has been analyzed in two well differentiated periods: harvest time and outside of it, since both present a well differentiated consumption profile. It has been shown that, from an energy point of view, photovoltaic self-consumption systems without storage can be suitable for oil mills, with a high self-consumption index ($> 80\%$), which provides a high matching capacity between the profiles of load and consumption, together with a self-sufficiency index ranging from 20 to 30% for the olive harvest period. In addition, it has been studied how the inclination angles and the orientation of the photovoltaic generator influence the indices of self-sufficiency and self-consumption.

As has been studied for oil mills, the potential presented by self-consumption photovoltaic installations for the industrial cold sector has also been analyzed. In this type of industry, its energy specificity must be taken into account, in particular, they present a profile with little variability and with a very prominent basic consumption throughout the year. It has been shown that in this type of industry self-consumption rates can be higher than 90% while achieving self-sufficiency levels of 40 to 50%. In addition, a new self-sufficiency index for hours of sunshine, $\phi_{SS,SH}$ is presented. This index assesses the performance of the photovoltaic self-consumption system compared to consumption only during sunny hours, so it can complement the self-sufficiency index and improve the analysis of this type of systems in the industrial sector. It should also be noted that the method developed, and that it has been applied to the two types of industries mentioned above, is easily extrapolated to any type of industry. Finally, it is essential to have real data on consumption profiles, since the latter allows us to guarantee useful results adjusted to the reality of an industrial sector that not only has high energy consumption, but is characterized by very high consumption profiles. characteristic and varied.

Close, distributed generation, with its many advantages, making use of photovoltaic solar energy, thanks to its easy integration at different points, versatility and distribution, must be widely developed to obtain reliable solutions adapted to the idiosyncrasies of the industrial sector, so particular and so important for local and global economic development, and all this framed within the disciplines of entrepreneurship, as a form of wealth generator and innovative development for the whole of society.

Tabla de contenidos

Agradecimientos	13
Resumen.....	15
Abstract	17
Tabla de contenidos	19
Estructura de la memoria.....	21
Parte I: Memoria	23
1. Introducción	25
2. Justificación	31
3. Objetivos	35
4. Publicaciones.....	37
4.1 Objetivo específico 1	37
4.2 Objetivo específico 2	38
4.3 Objetivo específico 3	39
4.4 Objetivo específico 4	41
4.5 Objetivo específico 5	42
4.6 Objetivo específico 6	43
4.7 Objetivo específico 7	44
5. Conclusiones y líneas futuras	47
6. Referencias	52
Parte II: Compendio de trabajos publicados	59
1. Relación de publicaciones en revistas JCR	61
2. Comunicaciones a congresos internacionales	

Estructura de la memoria

La memoria de esta tesis doctoral está dividida en dos partes bien diferenciadas. En la primera de ellas, se lleva a cabo una introducción sobre el objeto investigador de la tesis, se muestra su desarrollo, se presentan los objetivos planteados y los resultados alcanzados. Para finalizar, se exponen las principales conclusiones alcanzadas y se proponen algunas líneas de investigación futuras.

La segunda parte de esta memoria recoge todos los trabajos realizados en el marco de la presente tesis doctoral y publicados en revistas científicas y congresos internacionales, con índices de calidad adecuados, tal y como indica el correspondiente reglamento de la Universidad de Jaén para la elaboración de la tesis doctoral.

Parte I: Memoria

Se realiza una breve introducción de la situación energética mundial, y del nuevo paradigma al que se enfrenta la humanidad, de electrificación y generación distribuida. Esta nueva situación hace imprescindible avanzar en la investigación, desarrollo e implantación de fuentes de energía de origen renovable, siendo la energía solar fotovoltaica de autoconsumo, una de ellas, y el sector industrial uno de los principales candidatos para su consumo, siendo este el objeto principal de estudio de este trabajo de investigación. Se presentan los objetivos planteados para el desarrollo de la presente tesis doctoral. A continuación, se realiza una discusión de los resultados obtenidos en el desarrollo de los análisis efectuados. Y para finalizar, se presentan las principales conclusiones alcanzadas y las futuras líneas de investigación.

1. Introducción

La energía, junto con la contaminación o el cambio climático, son algunas de las problemáticas actuales que crean incertidumbres a la hora de vislumbrar el futuro de nuestra sociedad, y en las cuales se tiene que trabajar, desde los distintos estamentos de la sociedad, incluido el científico, para contribuir con diferentes soluciones a estos inminentes retos. Hace apenas 10 años, un 65,8 %, de la producción de energía primaria en la Unión Europea se basaba en fuentes no renovables. La energía nuclear, los combustibles fósiles y el gas natural eran sus máximos exponentes. En el período de 2008 a 2018, el crecimiento de las renovables ha sido continuado y ha experimentado un crecimiento del 49,2% [1]. En el 2018 éstas energías supusieron un 10,8% del total de la generación de energía mundial [2]. Por otro lado, en Europa, las energías renovables generaron el 18,9% de la energía eléctrica consumida en el año 2018 [3] y en España el 17,4% [4], porcentajes que continúan siendo relativamente bajos comparados con la generación proveniente de fuentes no renovables. En relación a la energía solar fotovoltaica, en Europa y en España su crecimiento continúa en aumento, pero aún muy por debajo del nivel de las fuentes no renovables. En España la capacidad instalada de fotovoltaica era de 4.725 MW en 2017 [5]. Actualmente, en marzo de 2021, según datos aportados por Red Eléctrica de España, ha superado los 8.000 MW, que representa el 10,9% del total de la capacidad de energía instalada en el país. Aun así, se espera que la generación energética a partir de esta fuente, la fotovoltaica, se encuentre en torno al 40% en 2050, lo cual la situaría como la principal fuente potencial de energía mundial en el futuro [6]. Además, las políticas mundiales, y concretamente las de la Unión Europea enmarcadas en el *Paquete de medidas sobre energía limpia para todos los europeos* [7] están encaminadas a aumentar significativamente las ayudas y promoción a la energías renovables. Esto supone que, aunque el proceso de cambio de modelo energético está iniciado, es necesario hacer frente al mismo con soluciones óptimas e innovadoras.

El cambio de modelo energético en curso, es fruto de decisiones que se alcanzan necesarias para reducir emisiones contaminantes y, por ende, complicaciones ambientales más severas en el planeta. Entre las soluciones más viables, y que ganan fuerza, se encuentra el cambio de modelo de producción energética, tanto en su forma como en su fuente. De aquí nace un posible cambio de paradigma, en lo que a distribución energética se refiere. La energía solar fotovoltaica cumple con los ingredientes necesarios para ser una de las principales fuentes generadoras más fortalecidas en este cambio de modelo. Gracias a los continuos cambios y desarrollos relacionados con las diferentes tecnologías energéticas, mediante el impulso de la posibilidad de generación local, denominada generación distribuida, hace que este nuevo concepto sea una realidad que esté construyéndose ya, gracias a la investigación y, a la implementación de sistemas reales, en numerosas ubicaciones, repartidas por todo el mundo.

Las decisiones tomadas en este aspecto, en ciertas ocasiones están ordenadas o reguladas por los organismos competentes [8], pero incluso siendo así, debe garantizarse de alguna manera que el desarrollo y la instalación se hace de la forma

más adecuada posible. El autoconsumo solar fotovoltaico permite generar energía eléctrica en el mismo lugar donde existe la demanda energética y autoconsumir esa energía generada o verterla a la red. En ese sentido, la generación distribuida, basada en el autoconsumo solar fotovoltaico junto con la importancia del consumo energético en las industrias, y como la Unión Europea trata de impulsar un consumo de energía sostenible, conduce a que el cambio a una red más distribuida no sea un fracaso o simplemente el resultado del impulso gubernamental, sino una realidad por convicción que, mejora la eficiencia y la sostenibilidad, lo que hará a los sectores beneficiados más competitivos, algo que es positivo y necesario.

En general, el impacto que la generación distribuida, a través del autoconsumo fotovoltaico, puede ocasionar ciertas alteraciones en la red de distribución, desde el punto de vista de las pérdidas y depende de factores como la ubicación de los generadores en la red de distribución, de la topología y estructura de la red, del grado de penetración en la red, del perfil de la demanda de la red, del tipo de tecnología de la generación distribuida, etc. Todo esto justifica la necesidad de investigación, y todo ello partiendo de resultados concluyentes, ya obtenidos por los estudios en sistemas fotovoltaicos de los miembros del equipo de investigación [9–11].

En el caso del autoconsumo fotovoltaico en el sector residencial hay estudios en los que se trata de establecer clasificaciones del perfil de consumo eléctrico, en función de factores tales como el número de convivientes, el uso de las instalaciones en cada estación del año, los electrodomésticos usados, etc. De la misma forma, el sector industrial tiene sus particularidades, como puede ser el sector al que se dedican o la zona geográfica donde se ubican. En ese sentido, es necesario adaptar los sistemas de autoconsumo fotovoltaico a la idiosincrasia de este sector, prestando especial atención al perfil de consumo eléctrico de cada subsector o de cada tipo de industria. Este aspecto puede significar un punto de inflexión en el desarrollo y la instalación de energía solar fotovoltaica en las industrias de cualquier tipo y tamaño, lo cual sería un enorme impulso para la generación distribuida.

Se han desarrollado proyectos de instalaciones fotovoltaicas de autoconsumo en numerosos lugares residenciales de todo el mundo, así como en industrias, aunque el crecimiento en estas últimas no es tan destacado como en el sector residencial, donde se pueden encontrar numerosos estudios relacionados con autoconsumo fotovoltaico, almacenamiento o monitorización. Existen numerosas investigaciones al respecto, como una revisión de instalaciones de autoconsumo fotovoltaico en edificios [12], la cual demuestra que es posible aumentar el autoconsumo entre un 13-24% utilizando baterías de almacenamiento hasta 1 kWh por kWp de potencia fotovoltaica instalada. Estos estudios han ido sentando las bases para el desarrollo y el crecimiento experimentado de la energía solar fotovoltaica y su integración en las viviendas, como es el caso del estudio realizado en Andalucía para analizar la capacidad de energía solar fotovoltaica, en los tejados de los edificios residenciales [13]. Estudios más enfocados a edificios, como un proyecto para la Armada Española, estudiándose los beneficios de su integración en varios edificios [14], o estudios pormenorizados del diseño, construcción y

puesta en marcha de un sistema solar fotovoltaico para una Facultad de Ingeniería [15].

Como ha sido destacado anteriormente, el estado del arte del autoconsumo fotovoltaico en la industria es bastante más reducido al del sector residencial. Se encuentran estudios en esta temática en diversos ámbitos. Algunos autores se centran en la realización de estudios comparativos entre diversas fuentes renovables para integrarla en la industria. Por ejemplo, en Pakistán se planteó un modelo usando Homer para integrar diferentes energías renovables eléctricas: fotovoltaica, eólica, baterías, para el sector industrial en una red híbrida con gas y gasoil, aportando unos resultados interesantes en ahorros energéticos [16], otros han realizado estudios de control de optimización para la gestión de la energía en industrias alimentarias, en este caso, de caña de azúcar, que dependen de la energía renovable que se utilice para maximizar el beneficio y la mayor sostenibilidad [17]. En otro estudio se realiza un análisis técnico y económico para utilizar fotovoltaica y eólica para abastecer un 10% de la demanda eléctrica de una industria minera en Antofagasta [18]. En el caso del autoconsumo fotovoltaico aplicado a la industria, las investigaciones se han centrado en valorar la viabilidad de los proyectos teniendo en cuenta la normativa de regiones concretas y otras características técnicas y económicas. En ese sentido, se ha analizado cómo la energía solar fotovoltaica puede ser una alternativa viable en el sector de las ferroaleaciones en Brasil [19], dado el menor coste de esta energía, comparado con otras de fuentes convencionales. Así mismo, se han abordado estudios de coste-beneficio para instalaciones fotovoltaicas en tejados de diferentes naves industriales, aportando un resultado positivo en cuanto al impacto económico y ambiental [20]. Existen publicaciones relativas a complejos industriales en Jordania, sin centrarse en una industria en particular, de cómo la fotovoltaica, puede ser una forma viable de suplir parte del consumo eléctrico, durante las horas solares, presentando estudios económicos que lo atestiguan, con resultados de ahorro de costes por kWh, de más del doble que con energías no renovables [21].

Como se puede apreciar, la mayoría de las investigaciones encontradas estudian la viabilidad de la energía solar fotovoltaica en industrias concretas, en zonas geográficas diferentes, como es el caso del estudio de la viabilidad fotovoltaica en industrias griegas [22], la configuración óptima de fracción del 40% de solar fotovoltaica conectada a red, en industrias de pequeño tamaño de Argelia [23] o el uso de nuevas metodologías para predecir de forma estadísticamente factible, la viabilidad de instalar fotovoltaica en una industria del sector metal de Dinamarca [24]. Así mismo, un estudio refleja, como la energía solar fotovoltaica en el sector industrial de Indonesia, puede suponer el 16% de la energía total anual demandada, con un período de amortización menor a los diez años y con un rendimiento de la inversión, que aumenta hasta los 20 años [25]. En este mismo país, se ha diseñado un sistema fotovoltaico, de más de 52 kW, en la cubierta de una industria, como alternativa para generar energía eléctrica [26]. Por otro lado, en España, otra investigación, analiza un caso real de instalación de 10 kW en una fábrica industrial situada en Valencia y como ésta reduce los costes de facturación eléctrica para amortizar la instalación solar fotovoltaica entre 5 y 10 años en función

de la radiación solar y el lugar donde se ubique [27]. En un terreno más específico se realiza una investigación sobre la capacidad de acoplar tecnología fotovoltaica en los sistemas de desalinización y sistemas de refrigeración [28]. Otros estudian la viabilidad de instalar fotovoltaica para el funcionamiento de una industria química [29] o estudios de idoneidad de la energía solar fotovoltaica en industrias medianas reales en Emiratos Árabes Unidos [30].

También en el ámbito industrial, existen otros trabajos sobre el almacenamiento fotovoltaico en este sector y cómo las instalaciones fotovoltaicas afectan a la huella de carbono [31]. Otros trabajos analizan el papel de los sistemas de gestión de la energía para determinar la carga y descarga de la batería y estrategias para reducir el uso de la red en el sector industrial con almacenamiento fotovoltaico [32]. Otros autores analizan el almacenamiento fotovoltaico con el objetivo de reducir la demanda de la red, pero todo ello caracterizando el perfil de consumo de la industria [33]. Otros estudios demuestran que puede ser viable, con una buena gestión, reducir en verano el coste eléctrico en un 54 % [34]. También existen estudios para el sector industrial donde se comparan tres soluciones de tipología de instalación solar fotovoltaica: una con paneles solares fotovoltaicos fijos, otra con seguimiento a un eje y por último, seguimiento a dos ejes, estudiándose la viabilidad en cada caso [35]. Otros autores reflejan un caso en Kenia, y como la fotovoltaica tiene la gran ventaja de poder favorecer al desarrollo territorial, concretamente se analiza el caso para una industria de producción de leche [36]. Los sistemas solar fotovoltaicos de autoconsumo hasta ahora mencionados son sistemas que tienen como respaldo la red eléctrica convencional, es decir, son sistemas conectados a red.

Tras la revisión bibliográfica se ha podido destacar que, al mismo tiempo que la bibliografía científica sobre la aplicación del autoconsumo fotovoltaico es escasa, no existe un método que permita analizar la idoneidad de un sistema fotovoltaico de autoconsumo para cubrir el consumo eléctrico de una industria dado el perfil del mismo y que esté adaptado a la idiosincrasia de este sector. Al mismo tiempo, y dada la gran variedad de industrias, cada una de las con sus perfiles de consumo eléctricos característicos, destaca la necesidad de realizar estudios *ad hoc* para determinar el nivel de acoplamiento entre los perfiles de consumo eléctrico de la industria y los perfiles de generación.

En ese sentido, y para abordar la realización de la presente tesis se han escogido las industrias de producción de aceites de oliva virgen, las almazaras y las industrias del sector del frío industrial. Las primeras porque suponen un importante tejido económico de España, en especial de Andalucía y sobretodo de la provincia de Jaén. Las segundas se han escogido porque tienen un perfil de consumo con poca variabilidad. En ambos casos, la incorporación de energía solar fotovoltaica de autoconsumo puede aportar valor y mejorar la competitividad de las industrias, como tratará de demostrar, entre otras cosas, esta tesis.

Existen más de 1.700 almazaras repartidas por el territorio nacional, con una superficie de cultivo superior a los dos millones y medio de hectáreas, y con una producción que supera el millón de toneladas de aceite de oliva [37]. Para la

provincia de Jaén es especialmente importante, pues es una de las grandes productoras, produciéndose el 45 % del aceite de oliva a nivel mundial [38]. Se pueden distinguir tres tamaños de almazaras, las más grandes tienen una producción media de 5.000 toneladas y un consumo eléctrico medio de 923 MWh, las almazaras medianas presentan una producción y un consumo eléctrico medio de entre 1000 y 5000 kg y 435 MWh respectivamente, y las almazaras pequeñas (<1000 toneladas) tienen un consumo eléctrico medio de 92 MWh [39], esto refleja el consumo eléctrico tan significativo que pueden llegar a tener este tipo de industria y la necesidad de hacerlas lo más sostenibles posibles, con una participación activa en el nuevo esquema de energía distribuida. Las almazaras presentan un perfil de consumo eléctrico muy característico, el cual tiene dos temporadas bien diferenciadas anualmente: la campaña de recolección del fruto durante unos 4 meses con un consumo casi continuado a lo largo de todo el día y el resto del año con un funcionamiento menos intenso, oficina y envasado si lo hubiese [39]. La importancia de este sector para determinadas zonas de España, así como, para muchos lugares de la cuenca mediterránea, sumada a que las almazaras tienen una situación deslocalizada energéticamente, hacen que la energía solar fotovoltaica pueda conseguir mejorar su eficiencia apostando por un modelo distribuido. En ese sentido, es necesario abordar una investigación que permita determinar las ventajas de la generación distribuida y de la energía solar fotovoltaica en este tipo de industria, que aparte de hacer frente al consumo eléctrico permitiría la posibilidad de fijar población, crear empleo o hacer las organizaciones más sostenibles.

En contraposición al perfil de consumo variante entre dos épocas del año de las almazaras, existen otro tipo de industrias que han sido seleccionadas por presentar un perfil de consumo eléctrico más constante. La industria del frío o de la refrigeración juega un papel fundamental en la cadena alimenticia para que los productos lleguen en las condiciones óptimas a los consumidores, el sector alimenticio (industria, distribución y hostelería) [40] supone en España el 40% en cifras de 2019 [41], y es un sector totalmente dependiente del sector del frío industrial, lo cual da una idea de la importancia y relevancia del mismo. Además, en el entorno más específico, el sector de la refrigeración, el mantenimiento y sus tecnologías factura en torno a los 5.000 millones de euros al año y ha experimentado un crecimiento de 7 puntos porcentuales de 2016 a 2018 [42]. Al igual que otros sectores industriales, este se caracteriza por tener un consumo con poca variabilidad las 24h del día, y durante la mayoría de los meses del año. Además, este consumo es superior en verano (altas temperaturas) donde la producción energética a partir de fotovoltaica es también mayor

Esta tesis doctoral industrial ha estado orientada, además de a aportar nuevos avances al estado del arte de la fotovoltaica de autoconsumo en la industria, a llevar estos avances y crear sinergias entre la industria, y la universidad, en concreto con sus alumnos de ingeniería. Llevar estos conceptos a las aulas, para que se tenga una perspectiva de los consumos, puede ser una herramienta que ayude a las sostenibilidad [43]. Las ventajas, entre otras, han sido ver como la industria y la universidad pueden crear un campo de desarrollo de nuevos avances tecnológicos

[44]. Estas actividades hacen que se desarrolle un espíritu de progreso, puedan desarrollarse nuevas tecnologías y aumenten las relaciones laborales [45].

2. Justificación

La gran necesidad de mejora energética en todo el sector industrial, y la escasa literatura acerca de la tecnología fotovoltaica aplicada a la misma: la mayoría de los trabajos científicos relacionados con el autoconsumo fotovoltaico están más centrados en sector residencial o de las oficinas [46–48], hacen que el desarrollo de esta tesis aspire a ampliar el conocimiento en la aplicación de la energía solar fotovoltaica en ciertos sectores industriales.

La inmensa posibilidad que brinda la energía fotovoltaica obliga a que la investigación se haga más constante y necesaria, haciendo trabajos en áreas donde son escasos los recursos científicos encontrados. Desarrollar trabajos en beneficio de la industria de diversos sectores, del cambio de modelo energético y, por consiguiente, del medio ambiente, puede hacer avanzar, en gran medida, a la generación distribuida. El eje principal sobre el que queda vertebrada esta tesis doctoral es realizar una aportación a la generación distribuida, basada en energía solar fotovoltaica, como forma de generación eléctrica distribuida en el sector industrial [49]. Esta tesis doctoral plantea a la comunidad científica aportaciones encaminadas a una mejora en la sostenibilidad del consumo energético, pilar básico en la lucha contra la contaminación y el cambio climático [50]. La investigación en torno a las energías renovables y, en concreto, sobre la energía solar fotovoltaica, es una necesidad para poder dar solución a los retos energéticos de la humanidad, que se han expresado anteriormente, de forma viable e incluso rentable [51]. La posibilidad de continuar con el sistema actual de generación y consumo energético, en base a energías muy contaminantes, no renovables y precursoras del cambio climático, es prácticamente imposible. Esto conduce a la investigación de nuevas tecnologías, a un punto de necesidad en el que sirvan para cambiar el sistema energético, con todo lo que ello conlleva. La generación de energía a través de energías renovables, la optimización del consumo, el almacenamiento, la eficiencia energética, etc., son líneas de investigación en las que se trabaja para dar soluciones viables en el desarrollo energético mundial. Además, la energía solar fotovoltaica es también una tecnología energética líder, en lo que a generación distribuida se refiere [52]. La importancia de la generación distribuida reside en la posibilidad existente de que fuentes de generación estén ubicadas cerca de los puntos de consumo [53]. También, la generación distribuida, con la energía solar fotovoltaica como su máximo exponente, tiene muchas otras ventajas, como el aprovechamiento de la superficie del tejado de las viviendas y empresas, la adaptación a los consumidores, o la notable capacidad para crear puestos de trabajo por MW instalado, frente a otras fuentes de energía [54]. Al estar la generación cerca del consumo se ahorran pérdidas de distribución [55], reduciéndose emisiones y coste energético [56]. En cambio, sigue siendo un tema poco consensuado a nivel global por las diferentes legislaciones; en España por ejemplo, estos sistemas distribuidos caracterizados por su baja potencia y por su ubicación cerca de los puntos de consumo [53] se entienden como los sistemas generadores eléctricos que se encuentran dentro de las redes de distribución [57].

Por todo esto, en esta tesis doctoral pretende desarrollar una investigación en industrias de sectores diferentes, para de esta manera, poder estudiar su consumo eléctrico, sus particularidades y analizar el potencial energético del autoconsumo fotovoltaico. Además de desarrollar técnicas y estrategias para un dimensionado fotovoltaico correcto y eficiente, que pueda preparar y convertir a estas industrias y por consiguiente a estos sectores industriales, en organizaciones donde la sostenibilidad juegue un papel preferente, haciéndolas más competitivas y sostenibles, aumentando la rentabilidad económica [58] y la eficiencia energética [59]. La importancia del sector industrial, puede ser explicada desde diferentes ámbitos, como por ejemplo, su consumo energético, este sector tiene para el mundo un peso relativamente alto, al ser el primer consumidor de energía mundial [60]. Esto lleva a plantear soluciones para uno de los sectores que más energía consume y, donde hasta ahora, el desarrollo de la energía solar fotovoltaica no había sido una prioridad, como se ha visto en la revisión del estado del arte. Por ello, se pretende estudiar de una manera más exhaustiva cómo es el comportamiento del consumo eléctrico en industrias de diversos sectores. A nivel de importancia del sector, también es destacable, pues la industria supone un gran porcentaje del tejido económico mundial. Para el caso de España, la industria es consumidora del 31% de la energía [61], y aportan al PIB de forma directa un 16,1% [62]. Además, los planes de la Unión Europea son ambiciosos, pues instan con diferentes medidas a relanzar ese sector como clave para aumentar la competitividad de la economía comunitaria, situando su peso en el 20% mínimo para cada país, en el año 2020 [63].

La situación en todas las vertientes exige compromiso, y todo aquello que vaya en beneficio del sector industrial es positivo, mejorando su sostenibilidad y competitividad, siendo el coste energético uno de los mayores en este tipo de actividad empresarial. En este aspecto, las políticas promovidas por la Unión Europea y España, reflejan un impulso para aumentar el tejido industrial, haciéndolo más fuerte, comprometido y resiliente ante las circunstancias económicas y sociales actuales y venideras [63,64]. Todo lo que sea en beneficio de potenciar este sector debe tenerse en cuenta, aún más en las circunstancias actuales, donde debido a la Covid-19, otro sector, el turismo, principal fuente de negocio del tejido económico de muchos países está comprometido. La situación exige involucrar al sector industrial como fuente de riqueza, de empleo y de crecimiento. Además, cuentan con un gran potencial para poder instalar la energía solar fotovoltaica, así se demostró para el sector residencial [65,66], y la industria tiene toda la capacidad para ello.

En esta tesis, dentro del Marco de Doctorado Industrial, se ha propiciado el desarrollo de diferentes investigaciones en industrias de diferente índole: almazaras, con su consumo particular estacional, e industrias del sector del frío, con un característico consumo basal, a priori elegidas por ser unas candidatas interesantes y que han hecho de esta tesis, un compendio de análisis, útil para desarrollar diferentes posturas y planteamientos. Se pretende acercar al sector industrial una energía solar fotovoltaica más adaptada al propio sector, teniendo en cuenta la idiosincrasia del mismo, ofreciendo instalaciones y métodos para un correcto dimensionado del sistema que se instalaría, con el consiguiente beneficio

medioambiental y económico. Uno de los principales retos de la energía solar fotovoltaica es el acoplamiento de las curvas de consumo y de generación. Por un lado, se tiene un generador fotovoltaico el cual tiene un perfil caracterizado por la producción durante las horas diurnas, situación donde la fotovoltaica es una alternativa muy viable sin necesidad de subvencionarla [67]. Por otro lado, un perfil de consumo eléctrico que, en el caso de las industrias, es muy característico dependiendo del sector y sus actividades, pudiendo ser diurno, nocturno, estacional, etc. El sistema, a grandes rasgos, funciona con una generación energética en función de la irradiancia solar, lo cual hace que, sin almacenamiento de energía, sea necesario un dimensionado lo más apropiado y correcto posible, donde la generación se adapte lo más posible al perfil de consumo particular de cada industria [68].

El potencial de la fotovoltaica en la industria está defendido por diferentes autores, los cuales plantean que los sistemas fotovoltaicos pueden ser considerados un sustituto viable como fuente de energía innovadora en diferentes procesos industriales, como es el caso de las desalinizadoras de agua, aunque la eficiencia del sistema dependerá de la correcta integración del sistema y del propio diseño y dimensionado del generador fotovoltaico [69]. Otros autores estiman el potencial del que se podría disponer si se instala energía solar fotovoltaica en las cubiertas industriales, por ejemplo, en Australia gracias a que existen las condiciones climáticas propicias, con su método hacen una previsión de que se podría generar 1.115 GWh de energía solar en un área de 6,52 km² de industrias y comercios, pero por el tamaño del generador es considerado poco práctico y realista. [70]. Esto demuestra que, aunque existen investigaciones y se están haciendo avances, aún quedan retos por afrontar en esta temática. Cada industria tiene un perfil de consumo eléctrico diferente y característico, es por ello que hay que realizar estudios y valorar si es necesario admitir soluciones *ad hoc*. Los parámetros con los que se realizan los estudios, hasta la actualidad, puede que no sean los más idóneos y haya que adaptarlos al contexto de estos consumidores industriales muy diferentes al sector residencial.

En el desarrollo de esta tesis se han analizado y se han realizado investigaciones acerca de sectores industriales concretos. En este caso, tal y como hemos avanzado previamente, los sectores escogidos han sido el de las almazaras de aceite de oliva y el de las industrias del frío. Escoger estos sectores es una decisión fundada principalmente en el entorno que rodea a este grupo de investigación, así como en la necesidad y las posibilidades que brinda la energía distribuida para afrontar perfiles eléctricos que, a priori, pueden ser perfiles muy adecuados para el autoconsumo fotovoltaico. Cada uno de estos sectores tienen unas necesidades energéticas diferentes, ya sea porque el consumo se da en horas diurnas, o porque existe un consumo más discontinuo en el tiempo. Todas ellas variables similares para un mismo sector, por los que los avances obtenidos pueden tener grandes aplicaciones. Hay que destacar que cada uno de los sectores tiene unas necesidades energéticas también distintas y bien diferenciadas y, por consiguiente, unas posibilidades de potencial fotovoltaico también distinto, será pues imprescindible caracterizar estos perfiles. A continuación, se justifican los sectores elegidos.

Las almazaras tienen un consumo característico, precisamente marcado por el significativo cambio que existe entre el consumo durante dos épocas del año claramente diferenciadas: campaña de recogida de aceituna y fuera de ella. El consumo permanece prácticamente invariable una gran parte de año, fuera de campaña, elevándose considerablemente en el momento que comienza la campaña de recogida de la aceituna y, por consiguiente, la producción del aceite de oliva. Sería difícil, sin realizar estudios previos de carácter científico, poder definir un sistema fotovoltaico de autoconsumo en una industria de este tipo, si se busca instalar el mejor sistema para ese caso.

El otro sector para el que ha sido estudiado el autoconsumo fotovoltaico ha sido la industria del frío industrial. Esta última, al igual que las almazaras, y en definitiva de todos los sectores industriales, tiene un consumo igualmente muy característico. Este consumo está marcado por un consumo basal con poca variabilidad durante todo el día, así como la mayoría de los meses del año. Tener información real de los consumos de estas industrias permite adaptar los sistemas fotovoltaicos a los mismos, de tal manera que se garantice un correcto desempeño. Conocer el tamaño del generador es vital para poder obtener la solución energética más acorde al comportamiento energético, para que las variables de fiabilidad, eficiencia, rentabilidad sean las más óptimas en cada caso.

En definitiva, para poder concluir con esta justificación es imprescindible destacar, a partir de todo lo que se ha ido indicando anteriormente, la necesidad de contar con una investigación sólida del potencial que puede presentar el autoconsumo fotovoltaico en el sector industrial. Las perspectivas de crecimiento del principal consumidor de energía indica el camino que se ha de seguir en la investigación; la industria no puede dejarse fuera del nuevo sistema de distribución energética que se plantea para los próximos años. De lo contrario, se perderá una oportunidad, tanto para la industria como para las energías renovables, y más específicamente, la energía solar fotovoltaica, la cual tiene un gran potencial tanto por su fiabilidad, eficiencia, flexibilidad y fácil integración.

La necesidad que surge es grande y ambiciosa, pero como se ha podido comprobar en el transcurso de esta tesis doctoral, la misma puede aportar unos resultados muy beneficiosos y claros para la industria y para la tecnología solar fotovoltaica en general. La falta de investigación en este ámbito podría suponer un freno a la evolución alcista de la generación distribuida y de la energía solar fotovoltaica. En cambio, si la apuesta es decidida, se pueden conseguir avances muy significativos en pocos años. Esto favorecerá de forma muy positiva en la reducción de emisiones contaminantes emitidas por fuentes de origen fósil, algo en lo que se verá directamente compensado el planeta y la vida que en él se desarrolla. Gracias al haber tenido un marco de doctorado industrial, se han conseguido unas relaciones beneficiosas para la institución académica, el progreso científico, y la industria. Además, haber desarrollado actividades enmarcadas en el emprendimiento, hacen que la transferencia del conocimiento haya sido mucho mayor, y puedan desarrollarse aún más, los resultados conseguidos.

3. Objetivos

Esta tesis tiene como objetivo principal analizar la idoneidad de los sistemas fotovoltaicos de autoconsumo en el sector industrial, así como definir parámetros novedosos adaptados a la idiosincrasia de este sector, para estudiar el nivel de acoplamiento entre los perfiles de generación fotovoltaica y los perfiles de consumo eléctrico de las industrias. Para ello, se ha desarrollado una metodología para el análisis de instalaciones fotovoltaicas de autoconsumo en las industrias y que puede ser especialmente útil en el dimensionado de las mismas. Hay que destacar que esta tesis doctoral cuenta con la implicación de varias empresas del sector de la eficiencia energética y las energías renovables que han facilitado el acceso a sus perfiles de consumo eléctrico, algunas de ellas con sistemas de autoconsumo fotovoltaicos ya instalados. Gracias a ellas se ha podido monitorizar, no solo los perfiles de consumo de las mismas, sino la generación fotovoltaica de las instalaciones de autoconsumo que tienen actualmente instaladas. Estos datos han sido la base sobre la que se ha construido esta tesis que, combinados con los estudios, datos y herramientas del Grupo de Investigación ENIAS (Equipo de Investigación en Ingeniería Aplicada y Energía Solar) de la Universidad de Jaén ha hecho que pueda desarrollarse una investigación sobre el autoconsumo fotovoltaico en el sector industrial.

A continuación, se especifican y explican brevemente los objetivos específicos cuyo cumplimiento ha sido clave a la hora de alcanzar el objetivo principal de esta tesis doctoral.

- Estudiar la legislación y revisar el estado del arte de los sistemas fotovoltaicos de autoconsumo. Se han analizado los diferentes casos presentados en la literatura, tanto en el sector residencial, como industrial.
- Buscar y elegir diferentes industrias repartidas por la geografía nacional y cuyo perfil eléctrico pueda ser un candidato adecuado para los sistemas de autoconsumo fotovoltaico. En esta búsqueda se han incluido también empresas que ya tienen instalado un sistema de autoconsumo fotovoltaico. Estas últimas pueden ser interesantes no solo porque aportan perfiles de consumo eléctrico, sino que proporcionan datos reales relativos al funcionamiento de los sistemas de autoconsumo fotovoltaico. En ese sentido, se ha creado una base de datos de diferentes industrias que proporcionan datos reales monitorizados de consumo eléctrico y de generación fotovoltaica. Esta última no solo servirá para la realización de la presente tesis, que se centrará exclusivamente en almazaras e industrias del frío, sino para abordar posibles líneas futuras de investigación.
- Monitorizar y caracterizar los perfiles de consumo de industrias de diferentes sectores. Se ha monitorizado durante un año el consumo eléctrico de varias empresas localizadas por diferentes puntos de la geografía española. Con los datos obtenidos de la monitorización se ha procedido a

caracterizar el consumo eléctrico de las mismas lo que permitirá una primera aproximación al estudio de la idoneidad de los sistemas fotovoltaicos de autoconsumo en las empresas anteriormente mencionadas. Además, se han obtenido los perfiles de irradiancia diarios durante el año de monitorización para cada una de las localidades consideradas.

- Análisis del nivel de acoplamiento de los perfiles de consumo y de generación de las industrias seleccionadas. Para realizar este análisis se ha recurrido a los perfiles diarios de consumo eléctrico y de generación fotovoltaica obtenidos durante un año. El estudio se ha realizado para diferentes valores de potencia pico del generador fotovoltaico.
- Estudiar el efecto de la orientación e inclinación del generador fotovoltaico en el nivel de acoplamiento de los perfiles de consumo y generación.
- Estudiar y analizar los métodos de análisis de los sistemas fotovoltaicos de autoconsumo. Definir nuevos y originales parámetros de análisis de sistemas fotovoltaicos de autoconsumo en el sector industrial adaptados a la idiosincrasia de este tipo de sistemas. Este hito ha permitido desarrollar un nuevo método de análisis del acoplamiento de los perfiles de consumo y de generación fotovoltaica aplicado al sector industrial a partir de las curvas de autoconsumo y autosuficiencia.
- Llevar a cabo una formación docente y de divulgación, así como de transferencia del conocimiento, en el ámbito de la energía solar fotovoltaica, en el sector industrial. Este objetivo ha permitido compartir experiencias, resultados y conocimientos en las aulas, en eventos técnicos y en congresos internacionales.

4. Publicaciones

En este apartado se recogen los trabajos que han sido desarrollados durante el transcurso de esta tesis doctoral. Las publicaciones realizadas han resuelto cada uno de los objetivos específicos que se han planteado en esta tesis doctoral. A continuación, se muestra cómo los trabajos realizados han dado cumplimiento a cada uno de los objetivos, así como los resultados más relevantes que se han obtenido.

4.1 Objetivo específico 1

El primer objetivo específico que se presenta es: *Estudio bibliográfico/legislativo y revisión del estado del arte para los sistemas fotovoltaicos aplicados al sector industrial*, el mismo ha sido desarrollado durante toda la tesis en cada publicación:

- [1] G. Jiménez-Castillo, F. J. Muñoz-Rodríguez, **A. J. Martínez-Calahorro**, G. M. Tina, and C. Rus-Casas, “Impacts of Array Orientation and Tilt Angles for Photovoltaic Self-Sufficiency and Self-Consumption,” *Electronics*, vol. 9, p. 348, 2020, doi: 10.3390/electronics9020348.
- [2] **A. J. Martínez-Calahorro**, G. Jiménez-Castillo, C. Rus-Casas, and F. J. Muñoz-Rodríguez, “Generación distribuida y autoconsumo fotovoltaico. Potencial energético para las industrias de las almazaras de España,” *Dyna: ingeniería e industria*, vol. 95, no. 6. Federación de Asociaciones de Ingenieros Industriales de España, Bilbao:, pp. 591–595, 2020, doi: <http://dx.doi.org/10.6036/9748>.
- [3] **A. J. Martínez-Calahorro**, G. Jiménez-Castillo, C. Rus-Casas, P. Gómez-Vidal, and F. J. Muñoz-Rodríguez, “Photovoltaic Self-Consumption in Industrial Cooling and Refrigeration,” *Electronics*, vol. 9, no. 12, p. 2204, 2020, doi: 10.3390/electronics9122204.

En todas las publicaciones se ha realizado una amplia revisión con numerosas referencias que permiten conocer el estado del arte actual de la energía solar fotovoltaica aplicada en el ámbito industrial. El contexto energético y tecnológico revisado pone de manifiesto que es propicio para el desarrollo de la energía distribuida. La energía distribuida tiene gran capacidad para solucionar aspectos negativos de la red de distribución, como podrían ser las pérdidas energéticas, además tiene grandes posibilidades, ya sea por su impacto positivo en la generación de empleo o por su puesta en marcha por medio de las energías renovables, en este caso la fotovoltaica, por su facilidad de integración arquitectónica en los diferentes puntos físicos de la edificación [13,71].

Se ponen de manifiesto en estas publicaciones algunos de los estudios previos que han sido desarrollados, en lo que al sector industrial se refiere, como, por ejemplo, estudios de viabilidad técnico económicos en las superficies de varias

industrias en Uganda [72] o en una industria en Grecia [22]. A su vez, se pone énfasis en las carencias que se encuentran como, por ejemplo, la necesidad de más especificidad en la investigación, teniendo en cuenta un análisis de los perfiles de carga reales o un aprovechamiento de la utilidad de los índices de autoconsumo y autosuficiencia, junto con sus curvas correspondientes a la hora de la realización del análisis y dimensionado de los sistemas de autoconsumo fotovoltaico.

4.2 Objetivo específico 2

El segundo objetivo específico que se presenta es: *Definición de los sistemas fotovoltaicos instalados en el territorio español con monitorización que se van a utilizar como base de estudio*, el cual ha sido desarrollado en las publicaciones:

- [1] G. Jiménez-Castillo, F. J. Muñoz-Rodríguez, **A. J. Martínez-Calahorro**, G. M. Tina, and C. Rus-Casas, “Impacts of Array Orientation and Tilt Angles for Photovoltaic Self-Sufficiency and Self-Consumption,” *Electronics*, vol. 9, p. 348, 2020, doi: 10.3390/electronics9020348.
- [2] **A. J. Martínez-Calahorro**, G. Jiménez-Castillo, C. Rus-Casas, and F. J. Muñoz-Rodríguez, “Generación distribuida y autoconsumo fotovoltaico. Potencial energético para las industrias de las almazaras de España,” *Dyna: ingeniería e industria*, vol. 95, no. 6. Federación de Asociaciones de Ingenieros Industriales de España, Bilbao:, pp. 591–595, 2020, doi: <http://dx.doi.org/10.6036/9748>.
- [3] **A. J. Martínez-Calahorro**, G. Jiménez-Castillo, C. Rus-Casas, P. Gómez-Vidal, and F. J. Muñoz-Rodríguez, “Photovoltaic Self-Consumption in Industrial Cooling and Refrigeration,” *Electronics*, vol. 9, no. 12, p. 2204, 2020, doi: 10.3390/electronics9122204.

Se ha realizado un estudio de diferentes tipos de industrias a analizar. Para la presente tesis se han escogido dos tipos: industrias de las almazaras e industrias del sector del frío. Se han dejado otros tipos de industrias para futuros trabajos de investigación. En todas las publicaciones se ha analizado de forma específica el comportamiento energético de las industrias anteriormente mencionadas, así como la idoneidad de los sistemas fotovoltaicos de autoconsumo, a través de datos monitorizados de consumo eléctrico. Se han elegido sectores poco o apenas estudiados hasta la fecha de esta investigación, incluso se han escogido industrias del mismo sector, pero ubicadas en diferentes zonas geográficas, lo que permite analizar el efecto de la misma no solo en el perfil de generación sino en el consumo eléctrico.

Para el caso de las almazaras, estudiados en las dos primeras publicaciones, se ha obtenido información de su perfil de consumo eléctrico, y de como éste se ve modificado en función de la época del año. Así mismo, se ha analizado el efecto de

la inclinación y la orientación del generador fotovoltaico en el perfil de generación, así como, en el nivel de acoplamiento en ambos perfiles [73]. Con todo ello, se ha demostrado que, desde un punto de vista energético, los sistemas de autoconsumo fotovoltaico sin almacenamiento pueden ser adecuados para almazaras. Se puede lograr un alto índice de autoconsumo ($> 80\%$), lo que proporciona una alta capacidad de emparejamiento entre los perfiles de carga y consumo, junto con un índice de autosuficiencia que va del 20 al 30% para el período de recolección de la aceituna (es decir, entre el 20% y el 30% del consumo de carga puede cubrirse con autoconsumo directo sin almacenamiento y la mayor parte de la energía fotovoltaica generada es autoconsumida por la almazara). Los valores del índice de autosuficiencia que proporcionan este tipo de sistemas en almazaras pueden ser bastante similares o superiores a los obtenidos en el sector residencial.

En el caso de las industrias del frío industrial, tercera publicación, se han escogido dos industrias ubicadas en diferentes enclaves, uno al norte y otro al sur, para que los resultados alcanzados sean más representativos y además puedan ser extrapolables al resto de industrias repartidas por la geografía española. Las dos industrias en estudio tienen instalaciones fotovoltaicas de autoconsumo de distintas potencias. Esto hace que los datos obtenidos puedan ser estudiados con mucho más detalle y que presenten mayor relevancia. Además, se incluye información de como estas industrias se comportan a nivel de perfil de carga, y de perfil de generación, si se consideran los sistemas fotovoltaicos de autoconsumo que tienen instalados. En ambos casos, existen diferencias apreciables en función de su ubicación. Se ha demostrado que Pueden proporcionarse índices de autoconsumo del 90%. Además, se han obtenido índices de autosuficiencia para el total (24 horas) y para las horas de sol del 25% y 50%, respectivamente, para la industria del sur, y del 26% y 45% para la industria del norte. Durante el día, la mitad del consumo de carga en este tipo de industria puede cubrirse con fotovoltaica al tiempo que se logran altos niveles de aprovechamiento de la energía fotovoltaica generada.

Como se ha comprobado esta información, será fundamental a la hora de determinar y desarrollar el camino de la investigación, para alcanzar unos resultados, los cuales estarán condicionados a la caracterización de los consumos que se realicen. Esto es prioritario, para un correcto dimensionado ajustado a la idiosincrasia de cada sector en particular, atendiendo no solo a criterios económicos o de superficie, sino a criterios específicos, resultando una instalación fotovoltaica eficiente y ajustada al perfil de consumo de la industria específica.

4.3 Objetivo específico 3

El tercer objetivo específico que se presenta es: *Monitorización y caracterización de los perfiles de consumo de las industrias de diferentes sectores*, ha sido desarrollado en las siguientes publicaciones:

[1] G. Jiménez-Castillo, F. J. Muñoz-Rodríguez, **A. J. Martínez-Calahorro**, G. M. Tina, and C. Rus-Casas, “Impacts of Array Orientation and Tilt Angles for

Photovoltaic Self-Sufficiency and Self-Consumption,” *Electronics*, vol. 9, p. 348, 2020, doi: 10.3390/electronics9020348.

[2] **A. J. Martínez-Calahorro**, G. Jiménez-Castillo, C. Rus-Casas, and F. J. Muñoz-Rodríguez, “Generación distribuida y autoconsumo fotovoltaico. Potencial energético para las industrias de las almazaras de España,” *Dyna: ingeniería e industria*, vol. 95, no. 6. Federación de Asociaciones de Ingenieros Industriales de España, Bilbao:, pp. 591–595, 2020, doi: <http://dx.doi.org/10.6036/9748>.

[3] **A. J. Martínez-Calahorro**, G. Jiménez-Castillo, C. Rus-Casas, P. Gómez-Vidal, and F. J. Muñoz-Rodríguez, “Photovoltaic Self-Consumption in Industrial Cooling and Refrigeration,” *Electronics*, vol. 9, no. 12, p. 2204, 2020, doi: 10.3390/electronics9122204.

Hay que destacar que para la realización de la presente tesis se ha contado, en ambos tipos de industrias, con datos de perfiles de consumo eléctrico reales, además de perfiles de generación fotovoltaica en el caso de las dos industrias del frío analizadas. Estos datos han sido obtenidos durante un año con un tiempo de almacenamiento de 15 minutos. Gracias a ello, no sólo se ha podido caracterizar el perfil de consumo eléctrico durante un año, aspecto que puede ser muy interesante para abordar otro tipo de estudio, como pueden ser de eficiencia energética, sino que permitirán trazar las curvas de autosuficiencia y autoconsumo para analizar la idoneidad de los sistemas de autoconsumo fotovoltaicos en las industrias estudiadas, tal y como se explicará en los objetivos específicos siguientes.

En las dos primeras publicaciones, la caracterización de la curva de carga, arroja información relevante en torno al consumo en este tipo de industrias. Las almazaras tienen un consumo muy particular, regido principalmente por un consumo más elevado durante los cuatro meses de campaña, y más inferior el resto de meses. Además, es característico que durante los meses de campaña, el consumo sea más elevado, tanto en la franja diurna, como nocturna. También se analiza el impacto del tiempo de registro en la estimación de índices de autoconsumo y autosuficiencia fotovoltaicos (ϕ_{sc} y ϕ_{ss}) en almazaras.

En la tercera publicación, el perfil de carga que se ha caracterizado es el de dos industrias del sector del frío. En este caso, el consumo es bastante característico al existir un consumo basal o constante, el cual ofrecerá oportunidades diferentes a la integración de la fotovoltaica en este tipo de instalaciones. Además, se demuestra que puede ser necesario definir nuevos índices y parámetros que tengan en cuenta la idiosincrasia de este sector y, por tanto, estimen mejor el comportamiento de los sistemas de autoconsumo fotovoltaico en este sector.

Conocer esta información ha permitido, poder llevar a cabo la investigación y tener información sobre el acoplamiento de las curvas, un paso esencial a la hora de obtener los índices de autoconsumo y autosuficiencia, los cuales ofrecen información muy relevante a la hora del dimensionado y de como la fotovoltaica puede adaptarse a un entorno industrial específico.

4.4 Objetivo específico 4

El cuarto objetivo específico que se presenta es: *Análisis de acoplamiento de los perfiles de consumo y de generación*, el mismo ha sido desarrollado en las publicaciones:

[2] **A. J. Martínez-Calahorro**, G. Jiménez-Castillo, C. Rus-Casas, and F. J. Muñoz Rodríguez, “Generación distribuida y autoconsumo fotovoltaico. Potencial energético para las industrias de las almazaras de España,” *Dyna: ingeniería e industria*, vol. 95, no. 6. Federación de Asociaciones de Ingenieros Industriales de España, Bilbao:, pp. 591–595, 2020, doi: <http://dx.doi.org/10.6036/9748>.

[3] **A. J. Martínez-Calahorro**, G. Jiménez-Castillo, C. Rus-Casas, P. Gómez-Vidal, and F. J. Muñoz-Rodríguez, “Photovoltaic Self-Consumption in Industrial Cooling and Refrigeration,” *Electronics*, vol. 9, no. 12, p. 2204, 2020, doi: [10.3390/electronics9122204](https://doi.org/10.3390/electronics9122204).

En ambos artículos, se analiza el nivel de acoplamiento de los perfiles diarios de consumo eléctrico, con los perfiles de generación fotovoltaica obtenidos a partir, de la irradiancia que nos proporciona PVGIS, durante un año. De esta manera se trabaja para poder conseguir, cual es la forma de acoplamiento más óptima, a bien de obtener un sistema fotovoltaico lo más adaptado posible a la idiosincrasia del sector industrial, donde se implante este tipo de generación distribuida.

En el primero de ellos, 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. Además, se consideran diferentes periodos de análisis para analizar el potencial de los SAF como alternativa energética en este tipo de industria. Se demuestra, 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. Además de que 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.

En el segundo de ellos, se analizan las curvas de autosuficiencia y autoconsumo, para cada mes del año, para dos industrias del sector del frío. Con ellos puede conseguir datos relevantes tales como conocer el tamaño del generador más óptimo, que garantiza el mayor acoplamiento posible entre las curvas de carga y producción [74,75]. Para un determinado rango de potencias, el autoconsumo puede presentar valores del 100%, y con el rango correcto se pueden tener meses donde se consiga un total aprovechamiento de la energía generada, sin necesidad

de almacenamiento. Fuera de este rango, la energía puede desaprovecharse en términos económicos, si no se consume en la propia industria. Esta información, es muy relevante a la hora de dimensionar un sistema fotovoltaico, para una industria con este consumo basal tan característico y que se produce durante todos los días del año.

4.5 Objetivo específico 5

El quinto objetivo específico que se presenta es: *Estudiar el efecto de la orientación e inclinación del generador fotovoltaico en el nivel de acoplamiento de los perfiles de consumo y generación*, ha sido desarrollado en la publicación:

[1] G. Jiménez-Castillo, F. J. Muñoz-Rodríguez, **A. J. Martínez-Calahorro**, G. M. Tina, and C. Rus-Casas, “Impacts of Array Orientation and Tilt Angles for Photovoltaic Self-Sufficiency and Self-Consumption,” *Electronics*, vol. 9, p. 348, 2020, doi: 10.3390/electronics9020348.

Para abordar este objetivo específico 5, se ha desarrollado un estudio del efecto de la orientación y la inclinación del generador fotovoltaico en el nivel de acoplamiento de los perfiles de consumo y generación. Este estudio se ha realizado para el caso de las industrias de las almazaras. No se ha realizado para las industrias del frío, ya que, del análisis de su perfil de consumo eléctrico, comentado en el objetivo específico 3, este presenta poca variabilidad a lo largo del día. Este estudio, para el caso de la almazara analizada, permitirá seleccionar la inclinación y la orientación que optimicen el nivel de acoplamiento de los perfiles de carga y generación.

En este artículo, como se ha destacado con anterioridad las almazaras tienen un perfil de carga caracterizado por un elevado consumo durante los meses de la campaña, en contraposición con el resto de meses del año. Con ello se ha pretendido poder obtener la orientación adecuada para unos resultados exitosos en su implantación. Se hace énfasis en obtener los resultados para una inclinación dada y con diferentes potencias.

Seleccionar la orientación es muy relevante a la hora de acoplar el perfil de consumo en el de generación, tener en cuenta el elevado consumo en una determinada época del año es primordial para obtener un sistema correctamente dimensionado. De igual forma, es muy importante hacer la valoración de la potencia del generador que se debe de instalar, a fin de conseguir la potencia adecuada para un aprovechamiento máximo de la energía solar fotovoltaico en su modo de autoconsumo.

En este caso se consigue conocer cuál es el impacto que tiene el generador y como pueden tomarse decisiones para esta industria en particular. Este trabajo analiza el potencial del sistema de autoconsumo fotovoltaico en función de la

potencia del campo, la inclinación del campo y los ángulos de orientación para afrontar el consumo eléctrico en las almazaras. Se consideran diferentes intervalos de registro y períodos de informe. Los resultados muestran que se puede alcanzar un índice de autosuficiencia del 40% sobre la base de la cosecha de aceitunas.

4.6 Objetivo específico 6

El sexto objetivo específico que se presenta es: *Estudiar y analizar los métodos de análisis de los Sistemas Fotovoltaicos de autoconsumo. Definir nuevos y originales parámetros de análisis de sistemas fotovoltaicos de autoconsumo en el sector industrial adaptados a la idiosincrasia de este tipo de sistemas.*, ha sido desarrollado en:

[3] **A. J. Martínez-Calahorro**, G. Jiménez-Castillo, C. Rus-Casas, P. Gómez-Vidal, and F. J. Muñoz-Rodríguez, “Photovoltaic Self-Consumption in Industrial Cooling and Refrigeration,” *Electronics*, vol. 9, no. 12, p. 2204, 2020, doi: 10.3390/electronics9122204.

En todas las publicaciones se ha tenido el objetivo de conseguir avances significativos en el desarrollo del conocimiento de los sistemas de autoconsumo fotovoltaico en el sector industrial. Pero en concreto, es en esta publicación donde se ha presentado un novedoso índice de autosuficiencia en horas solares.

Este nuevo índice de autosuficiencia en horas solares, $\phi_{SS,SH}$, evalúa el rendimiento del sistema de autoconsumo fotovoltaico frente al consumo solo durante las horas de sol, es un parámetro fundamental, para la toma de decisiones, en este tipo de instalaciones del sector industrial del frío, pues aporta información relevante para dimensionar la potencia más adecuada para cada industria, en función de su consumo basal y permite aumentar la competitividad de la misma, dado que reduce sus costes energéticos, a la vez que disminuye sus emisiones de CO₂. El método de análisis es fácilmente extrapolable, no solo a cualquier industria del frío, sino a cualquier industria que mantenga un consumo basal durante todo el año.

La ventaja que tienen este tipo de industrias, es la existencia de un consumo constante durante prácticamente todo el día y todos los días, de esta forma, es muy relevante conocer, cómo se comportaría la energía solar fotovoltaica en este tipo de casos. Aquí surge la necesidad de este nuevo índice, para dar respuesta, teniendo en cuenta el análisis para las horas solares, donde el generador genera energía, que, para este tipo de industrias, es clave.

De igual modo, se ha hecho uso en los artículos de métodos necesarios, para obtener información y análisis con los datos monitorizados. Se ha demostrado cómo este tipo de industria presenta un perfil de consumo con consumo basal alto y escasa

variabilidad durante las horas de luz, pudiendo ser un candidato interesante para el autoconsumo fotovoltaico. Además, sufren un aumento considerable del consumo en verano que se puede compensar con el aumento de la generación eléctrica por los paneles fotovoltaicos en esta misma temporada. Las curvas de autoconsumo y autosuficiencia, considerando un determinado rango de potencia del generador fotovoltaico, se han utilizado para analizar la idoneidad de los sistemas de autoconsumo fotovoltaico en este tipo de industria. Los perfiles de consumo y generación correspondientes a ambas industrias estudiadas en el artículo, proporcionan un nivel muy alto de acoplamiento para un intervalo de potencia de matriz relativamente alto, hasta 300 kWp, ya que los índices de autoconsumo pueden ser superiores al 90%. Además, teniendo en cuenta el nuevo índice definido, ambas industrias podrán cubrir la mitad del consumo anual durante el día de la energía fotovoltaica. Estos valores destacan la adecuación de los SAF, a este tipo de industrias con consumo basal.

4.7 Objetivo específico 7

El séptimo objetivo específico que se presenta es: Aspecto docente, de divulgación y *transferencia del conocimiento, en el ámbito de la energía solar fotovoltaica, en el sector industrial*, el cual ha sido desarrollado en las siguientes publicaciones a congresos internacionales y actividades:

1. **A. J. Martínez-Calahorro**, L. Hontoria, A. J. Partal-Ureña, F. J. Muñoz-Rodríguez, and C. Rus-Casas, “COMPANY-UNIVERSITY COLLABORATIONS IN THE FIELD OF RENEWABLE ENERGIES,” 2021.
2. L. Hontoria, **A. J. Martínez-Calahorro**, G. Jiménez-Castillo, J. D. Aguilar Peña, and C. Rus-Casas, “ACTIVITIES THAT PROMOTE MOTIVATION AND ENTREPRENEURSHIP IN THE MASTER OF RENEWABLE ENERGY,” 2021.
3. Miembro del Comité organizador de Foro de Gestión Energética Nacional FOROGen. Madrid. Año 2017
4. Impartición de conferencia internacional titulada: Autoconsumo y almacenamiento energético en la Universidad del Valle de Guatemala. Año 2018
5. Miembro del Comité organizador de GENERA. Madrid. Año 2018
6. Impartición de conferencia internacional titulada: Estrategias energéticas: autoconsumo fotovoltaico y almacenamiento energético en la Universidad Nacional del Este de Paraguay. Año 2018
7. Miembro del Comité organizador y ponente de la conferencia inaugural del Foro de Gestión Energética Nacional FOROGen. Madrid. Año 2018

8. Impartición de conferencia titulada: Perspectivas del autoconsumo y almacenamiento energético en viviendas, en el Master Universitario de Energías Renovables de la Universidad de Jaén. Año 2019
9. Impartición de conferencia titulada: Sistemas fotovoltaicos de autoconsumo y almacenamiento energético en viviendas, en el Master Universitario de Energías Renovables de la Universidad de Jaén. Año 2020
10. Impartición de conferencia titulada: Sistemas fotovoltaicos de autoconsumo. Aplicación al sector industrial, en el Master Universitario de Energías Renovables de la Universidad de Jaén. Año 2021

Como se ha visto, a lo largo de los diferentes artículos científicos que han sido desarrollados, se han obtenido resultados concluyentes en lo que al ajuste de la fotovoltaica para el sector industrial se refiere. El marco de esta tesis doctoral ha sido idóneo para esta investigación, así como, para la transferencia y difusión de los resultados en diferentes foros.

Este objetivo se ha concretado con la participación del doctorando como profesional del sector industrial, en las aulas de la Universidad de Jaén. Durante el tiempo que se ha desarrollado la tesis el doctorando ha participado en una clase sobre los avances en la investigación para estudiar en implantar sistemas fotovoltaicos de autoconsumo en el sector industrial dentro del Master de Energías Renovables. Esta difusión y transferencia también se ha llevado a cabo en el ámbito internacional en las Universidades del Valle de Guatemala y del Este de Paraguay. Finalmente, el aspecto de difusión y transferencia se completa con la participación del doctorando en eventos técnicos como FOROGEn o GENERA, además de las aportaciones a congresos internacionales que se han desarrollado.

En las publicaciones de congresos, se ha explicado de una forma detallada cómo es posible una transferencia del conocimiento obtenido en las investigaciones hacia la población, por ejemplo, los estudiantes. Esto es fundamental, para que los avances conseguidos, no sólo queden en el ámbito de la investigación, sino que tenga como salida natural también la formación. La colaboración en el aula del doctorado también se ha enriquecido con su perfil emprendedor y su colaboración en la formación del fomento del emprendimiento en las aulas. Esta colaboración pretende conseguir que los avances científicos germinen en el estudiante como ideas de negocio que supongan la creación de soluciones nuevas e innovadoras en torno al autoconsumo fotovoltaico en el sector industrial, lo cual vendrá a mejorar todo el entorno social, económico y tecnológico.

En el trabajo: *Company-university collaborations in the field of renewable energies*. Se revisan las diferentes formas de colaboración entre la universidad y la empresa, además de comentar casos específicos de la Universidad de Jaén en el ámbito de las energías renovables: el doctorado industrial y la colaboración docente de un experto en un tema concreto. Es importante señalar que los modelos de colaboración entre universidades y las empresas incorporan competencias y resultados de aprendizaje encaminados a la orientación laboral o iniciación a la

investigación de los estudiantes, mejoran su empleabilidad y facilitan la adquisición de actitudes emprendedoras. En consecuencia, las alianzas propuestas permitirán una integración más profunda de la empresa con los grupos de estudiantes a lo largo de las colaboraciones, proporcionando una buena forma de incorporar personal cualificado a la organización, lo que sin duda será de gran ayuda para las empresas a medio y largo plazo.

En el trabajo *Activities that promote motivation and entrepreneurship in the master of renewable energy*, se propone dentro del marco de un proyecto de fomento de la cultura emprendedora. El emprendimiento es fundamental para el avance de una sociedad, como motor de impulso para el desarrollo de la tecnología y la creación de empleo asociado a las nuevas tendencias en un mundo globalizado. Es por estas razones, por las que se ha trabajado en un eje principal, en este caso, en las ventajas que la experiencia de un profesional, puede dar a una asignatura de renovables a alumnos de un máster de energías renovables. Esta experiencia real, desarrolla en los alumnos, según los estudios realizados, una mayor capacidad para ver el emprendimiento asociado a los avances científicos, como una salida en su futuro laboral próximo. La experiencia se basa en la interacción de un emprendedor, en este caso el doctorando, en el campo de las energías renovables que muestra cómo uno de los temas tratados en la asignatura puede ser el germen de una idea de negocio. Como resultado, el alumnado ha valorado muy positivamente que el emprendedor encargado de la formación esté formado en la Universidad de Jaén, esto les ha hecho considerar el emprendimiento como una opción viable, y que puede ser desarrollada por personas como ellos mismos. Además, un 68% del alumnado que participa en la actividad valora muy positivamente la experiencia.

5. Conclusiones y líneas futuras

La presente tesis doctoral ha realizado una contribución para la mejora del análisis de sistemas de autoconsumo fotovoltaico en el entorno industrial a través de las curvas de autoconsumo y autosuficiencia. Como se ha indicado anteriormente, a diferencia del sector residencial, destaca sobremanera las escasas referencias bibliográficas que existen al respecto. En concreto, y aparte de definir un método de análisis adecuado a la idiosincrasia de este sector, la tesis se ha centrado en estudiar la idoneidad del autoconsumo fotovoltaico directo en las industrias de las almazaras y el frío industrial. Se han arrojado datos muy concluyentes sobre la viabilidad técnica de la fotovoltaica en estas industrias, definiendo incluso nuevos índices que ayuden al análisis y dimensionado de este tipo de sistemas, y así obtener la instalación fotovoltaica más adecuada en función del perfil de carga de la industria analizada. El conocimiento del nivel de acoplamiento de las curvas de generación fotovoltaicas y los perfiles de consumo eléctricos de una industria permite el desarrollo e impulsa la implantación de sistemas fotovoltaicos en la industria, que constituye uno de los sectores de la economía más consumidores de energía. Además, todo esto redundará en beneficio de la generación distribuida, gracias a la integración y fiabilidad de la energía solar fotovoltaica, reduciendo la dependencia de las fuentes de energías fósiles, así como, evitando pérdidas de distribución de energía. La capacidad de esta fuente de energía, cada vez más competitiva, se ha visto mejorado en España tras el Real Decreto 244/2019, por la reducción de la carga fiscal y el aumento de la capacidad competitiva, frente al anterior Real Decreto, al que algunos autores consideraban perjudicial.

Seguidamente, se presentan las principales conclusiones que se han obtenido en la realización de la tesis doctoral:

- Se ha podido conocer el potencial de los sistemas fotovoltaicos de autoconsumo, como ejemplo de generación distribuida, en las empresas del sector agroalimentario, en concreto las almazaras. Se ha analizado el consumo eléctrico real y el nivel de acoplamiento entre los perfiles de consumo y generación fotovoltaicos. Se han calculado los índices de autoconsumo y autosuficiencia, considerando diferentes periodos de tiempo (diario, periodo de cosecha y anual) y un rango de potencias de generador fotovoltaico hasta 2 MWp. Para la almazara analizada, y desde una perspectiva anual, se han alcanzado niveles de aprovechamiento de la energía fotovoltaica generada de un 75% y un índice de autosuficiencia superior al 25%. Dado el perfil de consumo de las almazaras, destaca el gran aprovechamiento de la energía generada, lo que pone de manifiesto, el valor añadido que proporcionan los sistemas fotovoltaicos de autoconsumo a este

tipo de empresas. El método de análisis y resultados son fácilmente extrapolables a cualquier almazara ubicada en España.

Durante la época de campaña el consumo es elevado y constante con lo que se puede alcanzar un buen acoplamiento entre los perfiles de generación fotovoltaica y consumo eléctrico durante las horas solares. Para un intervalo considerable de potencias del generador fotovoltaico, el aumento del índice de autosuficiencia es proporcional a la potencia instalada de generador fotovoltaico, a la vez que el índice de autoconsumo roza el 90%. Para la almazara objeto de estudio este comportamiento lineal se da hasta los 400 kWp, momento en el que el índice de autoconsumo es próximo al 90%, y el de autosuficiencia cercano al 20%. Si se realiza el análisis para el periodo fuera de campaña de recogida, el consumo de la almazara, aunque sigue manteniéndose prácticamente constante, disminuye significativamente. Esto hace que un generador de 200 kWp, por ejemplo, proporcione índices de autosuficiencia y autoconsumo del 28% y el 76%, respectivamente para este periodo. Finalmente, para la almazara analizada y considerando un periodo de análisis anual, se pueden obtener niveles autoconsumo de un 75% y un índice de autosuficiencia superior al 25%, para un generador de potencia de 300 kWp. Es de destacar como las industrias de este sector tienen la gran oportunidad de disponer de sus propios sistemas de autoconsumo fotovoltaico, con las ventajas que ello conlleva como modelo de generación distribuida.

- Se ha analizado el efecto de la orientación e inclinación del generador fotovoltaico sobre los índices de autosuficiencia y autoconsumo en una almazara. Los resultados muestran que se puede lograr un alto índice de autoconsumo ($>80\%$), lo que proporciona una alta capacidad de acoplamiento entre los perfiles de carga y consumo, junto con el índice de autosuficiencia que oscila entre el 20 y el 30 % durante la campaña de recogida de aceituna, valores que pueden ser bastante similares e incluso mayores a veces que los obtenidos en el sector residencial. Los ángulos de inclinación y orientación del generador, son igualmente parámetros clave, para maximizar el índice de autosuficiencia, estos dependen de la potencia instalada. Si se logra un diseño adecuado del sistema fotovoltaico, el índice de autosuficiencia puede oscilar entre 0,2 y 0,3 y el índice de autoconsumo puede ser relativamente alto dentro del rango 0,6-0,8 para una potencia de generador de 250-500 kWp. Se ha demostrado que, desde un punto de vista energético, los sistemas fotovoltaicos de autoconsumo sin almacenamiento, pueden ser adecuados para las almazaras, además los resultados aquí obtenidos, pueden extrapolarse a cualquier tipo de industria con un perfil de consumo de carga con baja variabilidad durante las horas solares.

- También se ha analizado el impacto que tiene el intervalo de almacenamiento de los datos monitorizados a la hora de estimar los índices de autoconsumo fotovoltaico y autosuficiencia en las almazaras. Debido a las particularidades del perfil de carga, caracterizado por presentar poca variabilidad durante las horas solares en la campaña de recogida, el porcentaje de error es inferior a 1,6% al considerar un intervalo de almacenamiento de 60 minutos frente a uno de 15 minutos. Por lo tanto, los datos de irradiación y consumo de carga con un intervalo de registro de 1 hora se pueden utilizar para estimar adecuadamente la energía autoconsumida y conocer los índices de autosuficiencia y autoconsumo.
- La aplicación del autoconsumo fotovoltaico en el sector del frío industrial y la refrigeración ha demostrado tener ante sí una oportunidad probada para poder reducir los costes energéticos y, por ende, ganar en competitividad y sostenibilidad gracias a la generación distribuida. Tras el análisis de datos reales de perfiles de consumo eléctrico se ha podido estudiar el nivel de acoplamiento entre los perfiles de consumo y de generación fotovoltaica de dos industrias mediante el cálculo de los índices de autoconsumo y autosuficiencia. Además, se ha definido un índice novedoso de autosuficiencia en horas solares: $\phi_{SS,SH}$, información relevante para dimensionar adecuadamente la potencia del generador fotovoltaico más adecuada para cada industria. El método de análisis es fácilmente extrapolable, no solo a cualquier industria del frío, sino a cualquier tipo de industria. Este índice, complementa la información proporcionada por el índice de autosuficiencia, ya que evalúa el desempeño del sistema de autoconsumo fotovoltaico frente al consumo solo en las horas de sol. Indica el nivel de cobertura de esta tecnología, limitándose exclusivamente al consumo existente en el período de tiempo en el que esta fuente de energía está activa. Al mismo tiempo, permite caracterizar mejor los sistemas de autoconsumo fotovoltaico en el sector industrial donde el perfil de consumo es muy variado y puede distribuirse de forma desigual a lo largo del día.

Para las dos industrias analizadas con sus actividades independientes se ha obtenido que el índice de autoconsumo es de 100%, hasta una potencia de 180 kW, y 120 kW, respectivamente, dependiendo del consumo basal. Los valores del índice de autosuficiencia en horas solares se encuentran cercanos al 50% en ambos casos. El análisis se ha realizado en un rango de potencias de generador fotovoltaico hasta 2 MWp. Los resultados demuestran que, durante el día, la mitad del consumo de carga en este tipo de industria puede cubrirse con fotovoltaica al tiempo que se logran altos niveles de aprovechamiento de la energía fotovoltaica generada, reduciendo

los puntos ZEI (Zero Emissions Industry), un término que hemos definido en la tesis, homólogo del punto ZEB (Zero Emissions Building) definido para el sector residencial. Dado el perfil de consumo de este tipo de industrias, caracterizado por un gran consumo basal, se destaca el gran aprovechamiento de la energía generada lo que pone de manifiesto el valor añadido que proporcionan los sistemas fotovoltaicos de autoconsumo a este tipo de industrias.

Es de destacar igualmente, las contribuciones realizadas en los congresos en el ámbito del emprendimiento, lo cual hace que los resultados se transfieran de una forma más directa e incluso puedan resultar ideas empresariales, siendo todo ello beneficioso, para la sostenibilidad y el desarrollo de la sociedad.

El poder disfrutar de una tesis enmarcada dentro de un programa de Doctorado Industrial, sumado a mi perfil profesional, con más de 25 años de experiencia en el sector industrial, ofrece unas ventajas y crea unas líneas de trabajo muy valiosas e interesantes. Prueba de ello ha sido mi participación en un programa de emprendimiento para orientar y capacitar a los alumnos en esta disciplina. Ello brinda, de un marco de referencia y desarrollo, donde se ha trabajado y seguirá haciéndose, en actividades que pueden originar nuevos proyectos, ideas empresariales, y aliciente para el desarrollo de nuevas carreras investigadoras. Esta unión hace que la investigación tenga una relevancia en muchos ámbitos, no solo para producción científica, sino para transferirla a la sociedad, ya sea a alumnos o empresas.

En lo referente a las líneas de investigación futuras se destaca que a partir de los resultados satisfactorios se pretende la continuidad de los estudios en este ámbito, con el objetivo de seguir desarrollando y aplicando la energía solar fotovoltaica en el sector industrial. Como se ha comprobado en esta tesis, cada tipo de industria tiene su propio perfil característico, por lo que se hace necesario hacer un análisis de idoneidad particularizada para cada una de ellas. Gracias al trabajo en esta tesis se ha podido generar una base de datos con los perfiles diarios durante un año de diferentes empresas para seguir investigando. Se ha concluido que existe un potencial para el autoconsumo fotovoltaico, como fuente para la generación distribuida en la industria, por lo que se mantendrá la monitorización y el análisis de nuevos centros industriales de diferentes sectores.

La investigación debe continuar en la senda de la energía distribuida, desarrollando métodos, análisis, y planteamientos de nuevos factores para conocer el comportamiento energético de las industrias y poder realizar el acoplamiento más

eficiente. Del mismo modo, otra línea de estudio deberán ser los sistemas de almacenamiento aplicados al sector industrial, para disminuir la variabilidad de la generación fotovoltaica. Finalmente, como otra futura línea que se plantea es la viabilidad y el análisis de nuevas soluciones tecnológicas fotovoltaicas para el ámbito industrial, para las que se deberá de conocer aspectos básicos como el autoconsumo y autosuficiencia. Es necesario seguir aportando nuevas investigaciones en este ámbito que impulsen definitivamente a la energía solar fotovoltaica en el sector industrial y, por ende, contribuyan al nuevo modelo de generación distribuida.

6. Referencias

- [1] Eurostat, Producción e importaciones de energía - Statistics Explained, (2020). https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_production_and_imports/es#La_producci%C3%B3n_de_energ%C3%ADa_primaria_disminuy%C3%B3_entre_2008_y_2018 (accessed February 5, 2021).
- [2] BP, BP Statistical Review of World Energy 2019., 2019. <https://doi.org/10.1001/jama.1973.03220300055017>.
- [3] Eurostat, Renewable energy statistics - Statistics Explained, (2020). https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Renewable_energy_statistics (accessed February 2, 2021).
- [4] Red Eléctrica Española, El Sistema Eléctrico Español 2019, 2019. https://www.ree.es/sites/default/files/11_PUBLICACIONES/Documentos/InformeSistemaElectrico/2019/inf_sis_elec_ree_2019_v2.pdf.
- [5] Tribunal de Cuentas Europeo, Energía eólica y solar para generar electricidad: es necesario adoptar medidas significativas para que la UE alcance sus objetivos, (2019). https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR19_08/SR_PHOTOVOLTAIC_ES.pdf.
- [6] DNV GL, Energy transition outlook 2018 oil and gas, 2018.
- [7] European Commission, Clean Energy for All Europeans – unlocking Europe ' s growth potential, (2016) 13. http://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/com_860_final.pdf.
- [8] Parlamento Europeo, Conselho Europeu, Directiva 2009/72/CE, J. Of. Da União Eur. L 211 (2009) 55–93. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:211:0055:0093:PT:PDF>.
- [9] F.J. Muñoz, G. Almonacid, G. Nofuentes, F. Almonacid, A new method based on charge parameters to analyse the performance of stand-alone photovoltaic systems, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 90 (2006) 1750–1763. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.solmat.2005.10.020>.
- [10] C. Rus, F.J. Muñoz, L. Hontoria, P.J. Pérez, D.L. Talavera, F. Almonacid, J. Aguilera, J.D. Aguilar, G. Almonacid, P. Rodrigo, M. Torres, *Instalaciones Fotovoltaicas*, 2012.
- [11] F.-C.J.I.] Jiménez- Torres M., Hontoria L., Rus-Casas C., Consideraciones fotovoltaicas para obtener configuraciones eficientes energeticamente., *Era Sol.* 6 (2016) p 6-15.
- [12] R. Luthander, J. Widén, D. Nilsson, J. Palm, Photovoltaic self-consumption in buildings: A review, *Appl. Energy.* 142 (2015) 80–94. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.028>
- [13] J. García, E. Jadraque Gago, J. Bayo, G. Martínez, Analysis of the

- photovoltaic solar energy capacity of residential rooftops in Andalusia (Spain), *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14 (2010) 2122–2130. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.01.001>.
- [14] A. Suárez-García, E.A. Fariña, M. Álvarez-Feijoo, D. González-Peña, C. Alonso-Tristán, M. Díez-Mediavilla, Estimation of photovoltaic potential for electricity self-sufficiency: A study case of military facilities in northwest Spain, *J. Renew. Sustain. Energy*. 9 (2017). <https://doi.org/10.1063/1.4995687>.
- [15] M. Chakravarthy, K.V.R. Murthy, B.N. Devi, Design, erection, testing and commissioning of 200Kwp rooftop grid tied solar photovoltaic system at Vasavi College of engineering, *Proc. - 2015 IEEE IAS Jt. Ind. Commer. Power Syst. / Pet. Chem. Ind. Conf. ICPSPCIC 2015.* (2017) 146–152. <https://doi.org/10.1109/CICPS.2015.7974067>.
- [16] Z. Javid, K.J. Li, R. Ul Hassan, J. Chen, Hybrid-microgrid planning, sizing and optimization for an industrial demand in Pakistan, *Teh. Vjesn.* 27 (2020) 781–792. <https://doi.org/10.17559/TV-20181219042529>.
- [17] E. Bernardi, M.M. Morato, P.R.C. Mendes, J.E. Normey-Rico, E.J. Adam, Fault-tolerant energy management for an industrial microgrid: A compact optimization method, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 124 (2021) 106342. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106342>.
- [18] E. Vyhmeister, C. Aleixendri Muñoz, J.M. Bermúdez Miquel, J. Pina Moya, C. Fúnez Guerra, L. Rodríguez Mayor, A. Godoy-Faúndez, P. Higuera, C. Clemente-Jul, H. Valdés-González, L. Reyes-Bozo, A combined photovoltaic and novel renewable energy system: An optimized techno-economic analysis for mining industry applications, *J. Clean. Prod.* 149 (2017) 999–1010. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.136>.
- [19] W.P. Dias, *Metallurgy and materials applied to ferroalloy industry, (1835)* 251–255.
- [20] B. Lee, M. Trcka, J.L.M. Hensen, Rooftop photovoltaic (PV) systems: A cost-benefit analysis study of industrial halls, *Int. J. Low-Carbon Technol.* 9 (2014) 319–326. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctt008>.
- [21] M. Hammad, M.S.Y. Ebaid, G. Halaseh, B. Erekat, Large scale grid connected (20MW) photovoltaic system for peak load shaving in Sahab Industrial District, Jordan *J. Mech. Ind. Eng.* 9 (2015) 45–59.
- [22] Georgios Vokas, Panagiotis Klironomos, John Kaldellis, Evaluation of Building Integrated Photovoltaic Systems' Potential in the Industrial Sector: Case Study of Oinofyta-Viotia Zone, Greece, *J. Energy Power Eng.* 7 (2013) 1–7. <https://doi.org/10.17265/1934-8975/2013.12.001>.
- [23] L. Berkani, A. Hamidat, F. Fodhil, O. Nadjemi, Z. Alliche, Feasibility study of grid-connected photovoltaic systems in small industrial enterprises, 2019 *Int. Conf. Adv. Electr. Eng. ICAEE 2019.* (2019) 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICAEE47123.2019.9015152>.
- [24] C.J. Lizarazo, Y.P. Hernandez, J.A. Hernandez, Methodology for power factor evaluation of an industrial-type user when photovoltaic system is

- used, 2017 IEEE 44th Photovolt. Spec. Conf. PVSC 2017. (2017) 1–6.
<https://doi.org/10.1109/PVSC.2017.8366393>.
- [25] E.A. Setiawan, F. Yuliana, Analysis of solar photovoltaic utilization in industrial sector for improving competitiveness in the smart grid, *Int. J. Smart Grid Clean Energy*. 7 (2018) 276–285.
<https://doi.org/10.12720/sgce.7.4.276-285>.
- [26] D.J. Damiri, S. Legino, S. Amboro, Engineering design development of 52,5 KiloWatt peak solar photovoltaic system for industrial Rooftop building, *J. Phys. Conf. Ser.* 1402 (2019). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1402/3/033087>.
- [27] P.B. Molina, J.Á.S. Jiménez, M.P.M. Palomares, B.Á. Valenzuela, Self-consumption solar photovoltaic systems for small installations. industrial factory application, 6 (2017) 1–15.
- [28] P. Byrne, L. Fournaison, A. Delahaye, Y. Ait Oumeziane, L. Serres, P. Loulergue, A. Szymczyk, D. Mugnier, J.L. Malaval, R. Bourdais, H. Gueguen, O. Sow, J. Orfi, T. Mare, A review on the coupling of cooling, desalination and solar photovoltaic systems, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 47 (2015) 703–717. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.083>.
- [29] J. Kinuthia, (Lecture Notes in Civil Engineering 6) Seyhan Firat, John Kinuthia, Abid Abu-Tair - Proceedings of 3rd International Sustainable Buildings Symposium (ISBS 2017)_ Volume 2-Spr.pdf, 2017.
- [30] M.N. Hussain, S.B. Qamar, I. Janajreh, S. Zamzam, Solar PV Implementation in Industrial Buildings: Economic Study, *Proc. 2017 Int. Renew. Sustain. Energy Conf. IRSEC 2017*. (2018).
<https://doi.org/10.1109/IRSEC.2017.8477355>.
- [31] M.D. Chatzisideris, A. Laurent, M.Z. Hauschild, F.C. Krebs, Environmental impacts of electricity self-consumption from organic photovoltaic battery systems at industrial facilities in Denmark, *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 66 (2017) 45–48.
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.100>.
- [32] L. Mahendra, V. Lystianingrum, A. Priyadi, Energy Management Design for Industrial Demand Considering PV Power Prediction and Battery SOC, *Proc. - 2020 Int. Semin. Intell. Technol. Its Appl. Humanification Reliab. Intell. Syst. ISITIA 2020*. (2020) 357–362.
<https://doi.org/10.1109/ISITIA49792.2020.9163787>.
- [33] A. Halbe, D. Yeaman, J. Ellington, Evaluation of grid-tied energy storage opportunity for the commercial and industrial sector in the U.S., 2017 IEEE 44th Photovolt. Spec. Conf. PVSC 2017. (2017) 1–5.
<https://doi.org/10.1109/PVSC.2017.8366392>.
- [34] P.G. Klironomos, G.A. Vokas, J.K. Kaldellis, Potential of building integrated photovoltaic systems (BIPV): Study on the oinofyta viotias industrial buildings zone, *IET Conf. Publ.* 2012 (2012) 1–6.
<https://doi.org/10.1049/cp.2012.2056>.
- [35] U. de Jaén, Proyecto UNIVER, (n.d.).

- https://www.ujaen.es/investiga/solar/04proyectos/02univer/00_presentacion/presenta.htm (accessed June 1, 2018).
- [36] R. Foster, B. Jensen, A. Faraj, J.K. Mwove, B. Dugdill, B. Knight, W. Hadley, Direct drive photovoltaic milk chilling: Two years of field experience in Kenya, ISES Sol. World Congr. 2017 - IEA SHC Int. Conf. Sol. Heat. Cool. Build. Ind. 2017, Proc. (2017) 932–941. <https://doi.org/10.18086/swc.2017.16.02>.
- [37] Agencia Andaluza de Promoción Exterior (Extenda), Estudio del sector del aceite de oliva en Andalucía (2017), (2017) 106. <https://www.extenda.es/wp-content/uploads/2018/01/ESTUDIO-DEL-ACEITE-DE-OLIVA-EN-ANDALUCIA-2017.pdf>.
- [38] P. y A. Ministerio de Agricultura, Producciones agrícolas - Aceite de oliva y aceituna de mesa, (n.d.). <https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/producciones-agricolas/aceite-oliva-y-aceituna-mesa/aceite.aspx> (accessed February 2, 2021).
- [39] FAECA, Manual de ahorro y eficiencia energética del sector, (2015) 1–52. <http://www.agro-alimentarias.coop/ficheros/doc/03201.pdf>.
- [40] International Institute of Refrigeration, 29th Informatory Note on refrigeration technologies: The role of refrigeration in the global economy, Paris, France, 2015. <https://iifir.org/en/documents/37047/download>.
- [41] Banco de España, Annual Report Spain 2018, 2019. <https://doi.org/10.3934/Math.2019.1.166>.
- [42] A. de empresas del frío y sus Tecnologías, Congreso AEFYT: Refrigeración, sector clave para la cadena de valor, (2019). <https://www.aefyt.es/index.php/component/content/article/13-articulos/blog-aefyt/602-aefyt-destaca-la-relevancia-de-la-industria-del-frio-para-la-economia-productiva-en-su-congreso-refrigeracion-sector-clave-para-la-cadena-de-valor?Itemid=101>.
- [43] J. Palm, K. Ellegård, Visualizing energy consumption activities as a tool for developing effective policy, *Int. J. Consum. Stud.* 35 (2011) 171–179. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1470-6431.2010.00974.x>.
- [44] I. Skute, K. Zalewska-Kurek, I. Hatak, P. de Weerd-Nederhof, Mapping the field: A bibliometric analysis of the literature on university–industry collaborations, *J. Technol. Transf.* 44 (2017) 916–947.
- [45] M.D.L.R.-G.A.U.-D.E.-Q.A.U.-C.R.-C.A.U.-J.D. Aguilar-Peña, ASSESSING THE IMPACT OF THE ACTIVITIES OF THE “PROMOTION OF THE ENTREPRENEURIAL CULTURE PROGRAMS” ON THE ENTREPRENEURIAL INTENTIONS OF THE ENGINEERING STUDENTS, in: 11th Int. Technol. Educ. Dev. Conf., 2017: pp. 8896–8903. <https://doi.org/10.21125/inted.2017.2102>.
- [46] L. Paciello, A. Pedale, D. Scaradozzi, G. Conte, A design tool for modelling and sizing of energy production/storage home system, EESMS 2014 - 2014 IEEE Work. Environ. Energy Struct. Monit. Syst. Proc. (2014)

126–131. <https://doi.org/10.1109/EESMS.2014.6923278>.

- [47] E. Ghiani, A. Giordano, A. Nieddu, L. Rosetti, F. Pilo, Planning of a smart local energy community: The case of berchidda municipality (Italy), *Energies*. 12 (2019). <https://doi.org/10.3390/en12244629>.
- [48] N. Martín-Chivelet, D. Montero-Gómez, Optimizing photovoltaic self-consumption in office buildings, *Energy Build.* 150 (2017) 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.073>.
- [49] P. Kästel, B. Gilroy-Scott, Economics of pooling small local electricity prosumers - LCOE & self-consumption, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 51 (2015) 718–729. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.057>.
- [50] M. Bazilian, P. Nussbaumer, C. Eibs-Singer, A. Brew-Hammond, V. Modi, B. Sovacool, V. Ramana, P.K. Aqrawi, Improving Access to Modern Energy Services: Insights from Case Studies, *Electr. J.* 25 (2012) 93–114. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2012.01.007>.
- [51] International Energy Agency (IEA), *Trends 2016 in Photovoltaic Application: Survey Report of Selected IEA Countries between 1992 and 2015, 2016*.
- [52] C.J. Sarasa-Maestro, R. Dufo-López, J.L. Bernal-Agustín, Analysis of photovoltaic self-consumption systems, *Energies*. 9 (2016). <https://doi.org/10.3390/en9090681>.
- [53] F. Gonzalez-Longatt, C. Fortoul, Review of the distributed generation concept: Attempt of unification, *Renew. Energy Power Qual. J.* 1 (2005) 281–284. <https://doi.org/10.24084/repqj03.275>.
- [54] and N.H. Will Blyth, Rob Gross, Jamie Speirs, Steve Sorrell, Jack Nicholls, Alex Dorgan, *Low carbon jobs: The evidence for net job creation from policy support for energy efficiency and renewable energy, 2014*. <https://d2e1qxpsswcpgz.cloudfront.net/uploads/2020/03/low-carbon-jobs.pdf>.
- [55] A. Ehsan, Q. Yang, Optimal integration and planning of renewable distributed generation in the power distribution networks: A review of analytical techniques, *Appl. Energy*. 210 (2018) 44–59. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.106>.
- [56] O. Rabaza, J. Contreras-Montes, M.J. García-Ruiz, F. Delgado-Ramos, D. Gómez-Lorente, Techno-economic performance evaluation for olive mills powered by grid-connected photovoltaic systems, *Energies*. 8 (2015) 11939–11954. <https://doi.org/10.3390/en81011939>.
- [57] E. Álvarez, U. Castro, *Generación distribuida y autoconsumo, Spain, 2014*. <https://www.orquestra.deusto.es/es/investigacion/publicaciones/informes/cuadernos-orkestra/297-generacion-distribuida-autoconsumo-analisis-regulatorio>.
- [58] V. Vita, Development of a decision-making algorithm for the optimum size and placement of distributed generation units in distribution networks, *Energies*. 10 (2017). <https://doi.org/10.3390/en10091433>.

- [59] D. Chiaroni, V. Chiesa, L. Colasanti, F. Cucchiella, I. D'Adamo, F. Frattini, Evaluating solar energy profitability: A focus on the role of self-consumption, *Energy Convers. Manag.* 88 (2014) 317–331. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.08.044>.
- [60] U.S. Energy Information Administration, Annual Energy Outlook 2020, 2020.
- [61] Estudios, informes y estadísticas | IDAE, (n.d.). <https://www.idae.es/estudios-informes-y-estadisticas> (accessed February 2, 2021).
- [62] Instituto Nacional de España (INE), Contabilidad nacional trimestral de España, (2018). https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736164439&menu=ultiDatos&idp=1254735576581 (accessed February 2, 2021).
- [63] C. From, T.H.E. Commission, T.O. The, T.H.E. Council, T.H.E.E. Economic, T.H.E. Committee, O.F. The, Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the regions: For a European Industrial Renaissance, (2014) 25.
- [64] C. y T. Ministerio de Industria, Nota interpretativa para el sector industrial sobre la aplicación del Real Decreto - Ley 10/2020, (n.d.). <https://www.mincotur.gob.es/es-es/COVID-19/Paginas/COVID-19.aspx> (accessed February 2, 2021).
- [65] A. Lopez, B. Roberts, D. Heimiller, N. Blair, G. Porro, U.S. Renewable Energy Technical Potentials: A GIS-Based Analysis, *Natl. Renew. Energy Lab. Doc.* 1 (2012) 1–40.
- [66] R. Singh, R. Banerjee, Estimation of rooftop solar photovoltaic potential of a city, *Sol. Energy.* 115 (2015) 589–602. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.03.016>.
- [67] D.L. Talavera, E. Muñoz-Cerón, J.P. Ferrer-Rodríguez, G. Nofuentes, Evolution of the cost and economic profitability of grid-connected PV investments in Spain: Long-term review according to the different regulatory frameworks approved, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 66 (2016) 233–247. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.012>.
- [68] G.C. Christoforidis, I.P. Panapakidis, T.A. Papadopoulos, G.K. Papagiannis, I. Koumparou, M. Hadjipanayi, G.E. Georghiou, A model for the assessment of different Net-Metering policies, *Energies.* 9 (2016). <https://doi.org/10.3390/en9040262>.
- [69] S. Mekhilef, R. Saidur, A. Safari, A review on solar energy use in industries, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15 (2011) 1777–1790. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.12.018>.
- [70] M.A. Nu, Photovoltaic Power from m Commercial and Industrial Rooftops s – Analysis for Cities of Brimb bank and Hobsons Bay in Victoria , Australia, (n.d.) 389–393.

- [71] T. Lang, D. Ammann, B. Girod, Profitability in absence of subsidies: A techno-economic analysis of rooftop photovoltaic self-consumption in residential and commercial buildings, *Renew. Energy*. 87 (2016) 77–87. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.09.059>.
- [72] N. Mukisa, R. Zamora, T.T. Lie, Feasibility assessment of grid-tied rooftop solar photovoltaic systems for industrial sector application in Uganda, *Sustain. Energy Technol. Assessments*. 32 (2019) 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.02.001>.
- [73] G. Jiménez-Castillo, F.J. Muñoz-Rodríguez, A.J. Martínez-Calahorra, G.M. Tina, C. Rus-Casas, Impacts of Array Orientation and Tilt Angles for Photovoltaic Self-Sufficiency and Self-Consumption, *Electronics*. 9 (2020) 348. <https://doi.org/10.3390/electronics9020348>.
- [74] D.L. Talavera, F.J. Muñoz-Rodríguez, G. Jimenez-Castillo, C. Rus-Casas, A new approach to sizing the photovoltaic generator in self-consumption systems based on cost-competitiveness, maximizing direct self-consumption, *Renew. Energy*. 130 (2019) 1021–1035. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.088>.
- [75] G. Jiménez-Castillo, C. Rus-Casas, G.M. Tina, F.J. Muñoz-Rodríguez, Effects of smart meter time resolution when analyzing photovoltaic self-consumption system on a daily and annual basis, *Renew. Energy*. 164 (2021) 889–896. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.096>.

Parte II: Compendio de trabajos publicados

La presente tesis doctoral es un compendio de **tres artículos publicados** en revistas de calidad reconocida indexadas en el **Journal Citation Report® (JCR)**, realizados en el marco de la tesis doctoral.

Esta tesis cumple el requisito establecido en el artículo 25 del Reglamento de los Estudios de Doctorado de la Universidad de Jaén (modificado por el Consejo de Gobierno de la Universidad de Jaén de fecha 18 de febrero de 2019), por el cual estos artículos deben estar acreditados en el ámbito de la especialidad de acuerdo a los criterios establecidos por la Comisión Nacional Evaluadora de la Actividad Investigadora (CNEAI) e incluidos obligatoriamente en la memoria, por lo que están adjuntados en la segunda parte de la misma. Además, se incluyen **dos aportaciones relevantes en congresos** internacionales de Tecnología y Educación.

1. Relación de publicaciones en revistas JCR

- [1] G. Jiménez-Castillo, F. J. Muñoz-Rodríguez, **A. J. Martínez-Calahorro**, G. M. Tina, and C. Rus-Casas, “Impacts of Array Orientation and Tilt Angles for Photovoltaic Self-Sufficiency and Self-Consumption,” *Electronics*, vol. 9, p. 348, 2020, doi: 10.3390/electronics9020348.

- [2] **A. J. Martínez-Calahorro**, G. Jiménez-Castillo, C. Rus-Casas, and F. J. Muñoz-Rodríguez, “Generación distribuida y autoconsumo fotovoltaico. Potencial energético para las industrias de las almazaras de España,” *Dyna: ingeniería e industria*, vol. 95, no. 6. Federación de Asociaciones de Ingenieros Industriales de España, Bilbao:, pp. 591–595, 2020, doi: <http://dx.doi.org/10.6036/9748>

- [3] **A. J. Martínez-Calahorro**, G. Jiménez-Castillo, C. Rus-Casas, P. Gómez-Vidal, and F. J. Muñoz-Rodríguez, “Photovoltaic Self-Consumption in Industrial Cooling and Refrigeration,” *Electronics*, vol. 9, no. 12, p. 2204, 2020, doi: 10.3390/electronics9122204.

Referencia / Reference:

G. Jiménez-Castillo, F. J. Muñoz-Rodríguez, **A. J. Martínez-Calahorro**, G. M. Tina, and C. Rus-Casas, "Impacts of Array Orientation and Tilt Angles for Photovoltaic Self-Sufficiency and Self-Consumption," *Electronics*, vol. 9, p. 348, 2020, doi: 10.3390/electronics9020348.

Estado / Status: Publicado / Published.

Índice de impacto / Impact Factor: 2,412

Categoría / Category: Engineering, electrical & electronic. Ranking (2019) 122/266 (Q2).

Abstract: Olive mills are extensive in the Mediterranean Basin, and Spain constitutes approximately 45% of global production. The industrial sector faces a new energetic paradigm where distributed generation provided by small renewable energy sources may reduce the dependence from fossil energy sources as well as avoid energy distribution losses. Photovoltaic self-consumption systems can play an important role in confronting this challenge due to their modularity and their decreasing cost. Most of self-sufficiency energy studies are focused on building sector and discussions about the idiosyncrasy of industrial load profiles, and their matching capability with photovoltaic generation profiles can be scarcely found. This work analyzes the potential of photovoltaic self-consumption systems as a function of the array power, array tilt, and orientation angles to face the electric consumption in olive mills. Different recording intervals and reporting periods are considered. Results show that a self-sufficiency index of 40% may be achieved on olive harvest basis. Moreover, due to the load profile particularities, percentage error lower than 1.6% has been found when considering a recording interval of 60 min when matching the olive load consumption and photovoltaic generation profiles. Chosen array tilt and orientation angles may be key parameters to maximize the self-sufficiency index.

Referencia / Reference:

A. J. Martínez-Calahorro, G. Jiménez-Castillo, C. Rus-Casas, and F. J. Muñoz-Rodríguez, “Generación distribuida y autoconsumo fotovoltaico. Potencial energético para las industrias de las almazaras de España,” *Dyna: ingeniería e industria*, vol. 95, no. 6. Federación de Asociaciones de Ingenieros Industriales de España, Bilbao:, pp. 591–595, 2020, doi: <http://dx.doi.org/10.6036/9748>

Estado / Status: Publicado / Published.

Índice de impacto / Impact Factor: 0,945

Categoría / Category: Engineering, multidisciplinary. Ranking (2019) 71/91 (Q4).

Abstract: El sector industrial se enfrenta a un nuevo paradigma de deslocalización energética, donde la generación distribuida puede presentar un papel destacado en la reducción del coste energético en las industrias, así como de sus emisiones de CO₂. Este trabajo muestra el potencial que pueden presentar los sistemas de autoconsumo fotovoltaico para hacer frente a parte del consumo en las industrias del sector agroalimentario, en concreto las almazaras. Se analiza el consumo eléctrico de este tipo de industria para una almazara, así como el nivel de acoplamiento entre los perfiles de consumo reales y los perfiles de generación fotovoltaicos estimados para un rango determinado de potencias del generador fotovoltaico. El método de análisis es fácilmente extrapolable a cualquier almazara ubicada en España. Así mismo, y dado que este tipo de industria tiene un perfil de consumo muy característico, los resultados obtenidos son fácilmente trasladables a otras almazaras. Para la almazara analizada, y desde una perspectiva anual, se ha estimado un nivel de aprovechamiento de la energía fotovoltaica generada de un 75% con un índice de autosuficiencia del 20%, poniendo de manifiesto el gran potencial de esta tecnología, como opción energética en este tipo de industria, así como en cualquier otra que presente un consumo con pequeña variabilidad.

Referencia / Reference:

A. J. Martínez-Calahorra, G. Jiménez-Castillo, C. Rus-Casas, P. Gómez-Vidal, and F. J. Muñoz-Rodríguez, "Photovoltaic Self-Consumption in Industrial Cooling and Refrigeration," *Electronics*, vol. 9, no. 12, p. 2204, 2020, doi: 10.3390/electronics9122204.

Estado / Status: Publicado / Published.

Índice de impacto / Impact Factor: 2,412

Categoría / Category: Engineering, electrical & electronic. Ranking (2019) 122/266 (Q2).

Abstract: The industrial sector has a great opportunity to reduce its energy costs through distributed generation. In this sense, the potential of photovoltaic self-consumption systems in the industrial cooling and refrigeration sector is shown. Two industries with photovoltaic self-consumption installations are shown and the electricity consumption profile of this type of industry which has a remarkable basal electricity consumption during daytime is analyzed. The matching between consumption and photovoltaic generation profiles is provided through the self-consumption and self-sufficiency curves considering different reporting periods (monthly and annual). Moreover, a new index is presented: self-sufficiency index for sunshine hours, 'SS,SH. This index evaluates the performance of the photovoltaic self-consumption system when facing the consumption only during sunshine hours. This index may complement the self-sufficiency index and may improve the analysis of this type of systems in the industrial sector. Self-consumption indices of 90% may be provided. Moreover, self-sufficiency indices for total (24 h) and for sunshine hours of 25% and 50%, respectively, for industry A, and 26% and 45% for industry B have been obtained. During daytime, half the load consumption in this type of industry may be covered by photovoltaics while achieving high levels of use of the photovoltaic energy generated.

2. Comunicaciones a congresos internacionales

- [4] **A. J. Martínez-Calahorro**, L. Hontoria, A.J. Partal-Ureña, F.J. Muñoz-Rodríguez, C. Rus-Casas, “*Company-university collaborations in the field of renewable energies*”, INTED2021 (15th annual International Technology, Education and Development Conference), 8 y 9 Marzo, 2021, ISBN: 978-84-09-27666-0
- [5] L. Hontoria, **A. J. Martínez-Calahorro**, G. Jiménez-Castillo, J. D. Aguilar Peña, C. Rus-Casas, “*Activities that promote motivation and entrepreneurship in the master of renewable energy*”, INTED2021 (15th annual International Technology, Education and Development Conference), 8 y 9 Marzo, 2021, ISBN: 978-84-09-27666-0

Referencia / Reference:

A. J. Martínez-Calahorro, L. Hontoria, A.J. Partal-Ureña, F.J. Muñoz-Rodríguez, C. Rus-Casas, “*Company-university collaborations in the field of renewable energies*”, INTED2021 (15th annual International Technology, Education and Development Conference)

Published in: INTED2021 Proceedings

Pages: 411 - 416

Publication year: 2021

Dates: 8th-9th March

ISBN: 978-84-09-27666-0

ISSN: 2340-1079

DOI: 10.21125/inted.2021.0110

Abstract: In an increasingly global and competitive scenario, universities must promote the integration of students into the labor market through high quality training that facilitates the development of skills and competencies. The university should be involved with labor market demands, so it must provide graduates who demonstrate a great capacity to adapt to very diverse changes and the ability to face complex situations. At all levels (national, regional and local), more and more initiatives leading to innovation, creation of self-employment, promotion of entrepreneurial initiatives or research studies are being supported and developed. All these profiles facilitate the inclusion of students in an increasingly competitive and complex job market. This work shows the experiences of a group of university professors who facilitate collaboration between companies and the university from two different points of view: the external collaborator who belongs to the world of industry and the industrial doctorate programs. In the first case, the acquired knowledge of an entrepreneur who has experience in both private business and public administration is provided to students. In the second case, the possibility of continuing postgraduate studies with the development of a doctoral thesis, particularly in the industrial field is provided to the students in the classroom. The results obtained are positive since competences such as innovation and entrepreneurship are worked on in the classroom, both closely linked to the promotion of professional skills as well as initiation to research and continuous training in order to start doctoral studies. The subjects studied are postgraduate subjects, so the students are very sensitive and concerned about their professional opportunities. They are extremely interested in how to undertake themselves, innovate and seek a professional opportunity to get their first job in some cases or continue their studies to develop a researcher profile and thus be able to access a more qualified occupation.

Referencia / Reference:

L. Hontoria, **A. J. Martínez-Calahorro**, G. Jiménez-Castillo, J. D. Aguilar Peña, C. Rus-Casas, “*Activities that promote motivation and entrepreneurship in the master of renewable energy*”, INTED2021 (15th annual International Technology, Education and Development Conference),

Published in: INTED2021 Proceedings

Pages: 417 - 423

Publication year: 2021

Dates: 8th-9th March

ISBN: 978-84-09-27666-0

ISSN: 2340-1079

DOI: 10.21125/inted.2021.0111

Abstract: Currently in university education methodological strategies are introduced that involve modifications of traditional teaching in order to achieve the competences linked to the different subjects are composed of the degree. The design of the activities to be introduced in the teaching planning to achieve the learning outcomes sometimes depends on the subject in which the professors want to be trained and also on level to be achieved in the degree. Learning enables a student to perform actions such as: remembering data or facts, understanding concepts, explaining facts, reasoning, arguing, understanding, applying knowledge in solving practical or theoretical problems or making judgments; which they subsequently use in the performance of their profession. The learning outcomes of university education systems are used to recognize the qualifications of professionals. With a training model in higher education centered on the student, it is important that the professor devise activities that are not focused on what the professor teaches, but on what the student is capable of understanding upon successful completion of the learning process. In this sense, the following work is proposed, developed within the framework of a project to promote entrepreneurial culture. The experience is based on the interaction of an entrepreneur in the field of renewable energies who shows how one of the topics dealt with in the subject can be the germ of a business idea. The initiative has had a positive effect on the students since they have connected theory with practical application and the realization of a technical project based on the subject in question. This shows that the proposed methodological initiative not only meets teaching expectations but also motivates them in a more flexible and effective training for the students involved. In addition, it has opened up enormous possibilities for students within the framework of university - business collaboration on the part of the entrepreneur involved in the activity. Some of the possible scenarios in which to integrate students would be company internships, extracurricular internships or the completion of a master's thesis supervised by both parts.