



Universidad de Jaén

Escuela de Doctorado

UNIVERSIDAD DE JAÉN

ESCUELA POLITÉCNICA

SUPERIOR DE JAÉN

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA

ELECTRÓNICA Y AUTOMÁTICA

TESIS DOCTORAL



**CONTRIBUCIÓN A LA MONITORIZACIÓN Y
ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

PRESENTADA POR:

Gabino Jiménez Castillo

DIRIGIDA POR:

Dra.Ing. D.^a Catalina Rus Casas

Dr.Ing. D.Francisco José Muñoz Rodríguez

JAÉN, Mayo 2019

UNIVERSIDAD DE JAÉN



Universidad de Jaén

Escuela de Doctorado

TESIS DOCTORAL

CONTRIBUCIÓN A LA MONITORIZACIÓN Y ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

AUTOR

Gabino Jiménez Castillo

DIRECTORES

Dra. D^a. Catalina Rus Casas

Dr. D. Francisco José Muñoz Rodríguez

TUTORES

Dra. D^a. Catalina Rus Casas

Dr. D. Francisco José Muñoz Rodríguez

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA

ELECTRÓNICA Y AUTOMÁTICA

JAÉN, MAYO 2019

UNIVERSIDAD DE JAÉN



Universidad de Jaén

Escuela de Doctorado

TESIS DOCTORAL

CONTRIBUCIÓN A LA MONITORIZACIÓN Y ANÁLISIS
DEL FUNCIONAMIENTO DE
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

TRIBUNAL EVALUADOR

Presidente:

Secretario:

Vocal:

Suplente:

Suplente:

UNIVERSIDAD DE JAÉN

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y
AUTOMÁTICA

TESIS DOCTORAL

La memoria titulada: "**Contribución a la monitorización y análisis del funcionamiento de sistemas fotovoltaicos**" ha sido presentada por el aspirante a doctor en Energías Renovables D. Gabino Jiménez Castillo, bajo la dirección del Dr. D. Francisco José Muñoz Rodríguez y de la Dra. D^a. Catalina Rus Casas y ha sido desarrollada dentro del Departamento de Ingeniería Electrónica y Automática.

Jaén, mayo 2019

El doctorando



Fdo. Gabino Jiménez Castillo

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 recibida a través de una ayuda para la Formación de Personal Investigador con cargo al Plan de Apoyo a la Investigación, al Desarrollo Tecnológico y a la Innovación de la Universidad de Jaén 2014-2015 (prorrogado).

Agradecimientos

El resultado del mundo que actualmente conocemos no sólo es debido a una causa y/o casualidad, sino quizás a un número tan elevado de causas y casualidades que ni siquiera nos podemos imaginar. Posiblemente de manera más simplificada se puede extrapolar a cualquier resultado de un trabajo, y esta tesis no es un caso aislado, por tanto, estoy seguro de que no se hubiera empezado e incluso terminado sino hubiera habido un gran número de casualidades y causas. Tampoco esta tesis es el esfuerzo de una única persona, sino de un grupo de ellas que, por desgracia, no siempre les agradezco todo lo que se merecen y menos aún dejo constancia de ello (espero no dejarme en alguna parte de mi memoria a alguno). Tal vez no encuentre las palabras idóneas para reflejar mis sentimientos de agradecimiento, es posible que algunas de ellas ni siquiera las pertenezcan aún a mi léxico, pero voy a intentarlo:

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis directores y tutores de tesis, Catalina Rus Casas y Francisco José Muñoz Rodríguez, por cada uno de los segundos que me habéis dedicado, por todo el apoyo, por vuestra especial atención, por vuestra extremada paciencia con todas las piedras que nos hemos encontrado en este camino, por todo el rigor que tenéis en cada trabajo y por la confianza depositada en mí desde hace ya unos pocos años, exactamente desde aquél inocente octubre del 2009 en que empecé mi primer trabajo fin de carrera con vosotros. Todas las lecciones de vida que habéis compartido conmigo y todos los consejos que me habéis recomendado han sido extremadamente enriquecedores en todos los ámbitos: científico, académico y sobre todo en el personal. Admiro vuestro saber SER y ESTAR y siempre pretender que ante todo sea una mejor persona. Muchas gracias de corazón, siempre estaré en deuda.

Quiero mostrar mi agradecimiento a Diego López por sus explicaciones de economía para poder sacar adelante parte de los trabajos presentes en esta tesis. Gracias por su amabilidad, por su tiempo y sus ideas.

A Juan Ignacio, por toda su ayuda en el montaje de los sistemas que estamos monitorizando, gracias por facilitarme y ayudarme a conseguir tantos datos experimentales, así como toda la ayuda prestada sin pedir nada a cambio.

A Juan Domingo Aguilar quiero agradecerle todas sus charlas, toda la confianza depositada para formar parte de sus proyectos docentes. Por ayudarme de manera desinteresada y resolver aquellas dudas que le he preguntado.

A Francisco Baena, por resolverme todas y cada una de las dudas que le he planteado.

A Cristian Cruz, por ayudarme a realizar el seguimiento y mantenimiento de los sistemas, así como su colaboración al ordenar los datos experimentales.

Esta tesis se ha realizado en el seno de una estructura de trabajo. Agradezco a cada uno de sus miembros, en especial su director, Pedro Gómez Vidal, por depositar su confianza en mí durante estos años. También quiero agradecer al grupo de investigación IDEA, sin su apoyo no hubiera podido disfrutar de la ayuda del plan propio de la Universidad de Jaén. Hago extensibles mis agradecimientos a todos los profesores y compañeros del Departamento de Ingeniería Electrónica y Automática, con muchos de vosotros he tenido numerosas conversaciones y reflexiones enriquecedoras.

A la Universidad de Jaén me gustaría agradecer la concesión de la acción 15 de su plan propio para la formación del personal investigador, así como la acción 6 destinadas a estancias breves del Personal Investigador en Formación encaminadas a la obtención del

título Doctor con Mención Internacional, las cuales me han permitido realizar la presente tesis y completar mi formación científica en el extranjero.

Vorrei ringraziare Giuseppe Marco Tina per la stupenda supervisione, l'attenzione e l'appoggio che ha mostrato durante il mio periodo di ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Elettronica ed Informatica – Università degli Studi di Catania. Grazie mille.

Agradezco a Eulogio Castro Galiano, responsable del programa de doctorado en Energías Renovables, que desde aquél 7 de Julio del 2016 que me presencié por primera vez en su despacho me ha ayudado y aconsejado.

También hago extensibles mis agradecimientos a todo el personal administrativo de la Escuela de Doctorado, de la sección de Estudios de posgrado, servicio de gestión de la investigación, por resolver todas y cada una de mis dudas en todos los trámites realizados.

No quiero olvidarme aquí y expresar mi agradecimiento más profundo a mis amigos de toda la vida, Adori, Jesús y Gabriel, así como como los que conocí ya en mi etapa de 'adulto', Manuel Calmaestra, Marisa, Ana María Moral, Jaime Arjona y Jorge Manuel Mercado y en definitiva de todos mis amigos, por cada palabra de apoyo, ánimo y consejos, en especial a todos por estar tan pendientes de mí en estos últimos meses que tan complicados han sido. Gracias.

Agradezco a Isa (un claro ejemplo que la vida te da bellas personas, pero se requiere un conjunto de casualidades) por confiar y creer en mí mucho más de lo que yo soy capaz de mí mismo, por haber soportado las 'caídas en picado' de últimos años y a pesar de todo seguir tenaz. Por todas y cada una de tus acciones para animarme en esos momentos no tan agradables. Eres una gran persona y serás una gran cirujana. Gracias por enseñarme tanto de la vida.

Agradezco a todos mis familiares por el apoyo mostrado. A mis sobrinas Ainhoa, Natalia y a mi sobrino Diego que proporcionáis esa pizca de alegría y vitalidad tan necesaria para seguir. A mi cuñado Rober y mi cuñada M^a Eugenia por animarme a seguir adelante en esta lucha y mostrar tanta confianza en mí. A mi hermano Antonio Cristóbal por animarme y ayudarme en los menesteres del día a día. A mi hermana Manoli, por nuestras extensas charlas para seguir 'batallando', por todos tus consejos, por tu paciencia, por enseñarme tanto de la vida. Tengo mucha suerte de tenerte como hermana. A la mejor madre que se puede tener, sin ti nada hubiera sido posible, gracias por tu respaldo, por todo el sacrificio que has realizado y por ese amor incondicional. Gracias a todos por enseñarme los valores humanos tan imprescindibles de esta vida: respeto, honestidad, responsabilidad, gratitud, prudencia, humildad, sensibilidad, tolerancia...

Ahora es el momento personal más complicado, pero me gustaría agradecerte papá, allá donde estés, todo el sacrificio que realizaste, que sólo tú sabrás, para que pudiera tener una vida digna. Siempre estás y estarás en mi mente. El trabajo, la constancia, el sacrificio y no rendirse son valores imprescindibles que me enseñaste, sin los cuales esta tesis no hubiera salido a la luz. Además de enseñarme y mostrarme lo importante que es saber que pasara lo que pasara, siempre las personas que realmente te quieren siguen estando. Ahora que poco a poco empiezo a dar mis primeros pasos en esto la vida, comienzo a 'entender' algunas cosas. ¡Muchas gracias!

Resumen

Uno de los retos tecnológicos a los que se enfrenta la sociedad actual es cambiar la tendencia de uso de los recursos energéticos, es decir, utilizar energías renovables limpias y eficientes que respeten al medio ambiente y que tengan la capacidad de hacer frente al mayor porcentaje posible de consumo energético. Los sistemas fotovoltaicos son una alternativa viable tanto económica como tecnológicamente que pueden desempeñar un papel clave para la transición hacia una economía baja en carbono. En ese sentido, para el estudio de su viabilidad y durabilidad, es trascendental el uso de métodos y herramientas que permitan evaluar su funcionamiento a partir de datos recogidos durante su monitorización. Estos datos resultan ser de gran interés, puesto que permiten analizar el funcionamiento de las diferentes arquitecturas que pueden presentar los sistemas fotovoltaicos y evaluar si los objetivos planteados inicialmente en el diseño han sido logrados.

Las señales con modulación por ancho de pulsos (PWM, pulse-width modulation) que son generadas por los reguladores de carga PWM en los sistemas fotovoltaicos autónomos, no son sencillas de monitorizar. Debido a la naturaleza de estas señales, se requieren sistemas de monitorización capaces de realizar muestreos simultáneos entre las señales de corriente y tensión, así como una frecuencia de muestreo elevada, lo que produce una enorme cantidad de datos recopilados. Aunque estos inconvenientes se pueden solucionar con sistemas de adquisición de altas prestaciones, el coste de estos últimos puede ser elevado si se tiene en cuenta el bajo coste relativo de los sistemas fotovoltaicos que utilizan reguladores tipo PWM: la mayoría de ellos suelen ser sistemas fotovoltaicos autónomos de media o pequeña potencia. En consecuencia, se requiere un cambio de enfoque que permita desarrollar técnicas de monitorización para este tipo de señales sin la necesidad de recurrir a sistemas de altas prestaciones, que presenten un coste proporcional al de este tipo de sistemas fotovoltaicos y que, a su vez, proporcione medidas con la adecuada precisión y exactitud.

Una fuente significativa de error en la monitorización de los sistemas fotovoltaicos se puede encontrar también en el intervalo de muestreo y en el intervalo de registro a la hora de realizar estimaciones de energías. En este sentido, estas últimas no sólo tienen utilidad a la hora de realizar balances energéticos para el análisis del funcionamiento del sistema, sino que su estimación puede repercutir en determinados parámetros económicos. Tal es el caso de los sistemas de autoconsumo fotovoltaico en los que la estimación energética realizada con datos monitorizados no sólo tiene una repercusión técnica sino también económica derivada de una inadecuada estimación de la energía fotovoltaica autoconsumida o vertida a la red. Así mismo, también puede provocar dimensionados erróneos en soluciones *ad hoc* a partir de datos monitorizados.

Con el desarrollo de esta tesis se pretenden abordar soluciones para diferentes aspectos en la monitorización de sistemas fotovoltaicos, especialmente para los sistemas fotovoltaicos autónomos y de autoconsumo. De acuerdo con esto, se desarrollan nuevas técnicas de monitorización que proporcionen los parámetros necesarios que permitan reconstruir las formas de ondas de corriente y tensión necesarios para poder calcular la potencia entregada por el generador fotovoltaico y así estimar la energía de salida del mismo en los sistemas fotovoltaicos que utilicen reguladores PWM del tipo serie y paralelo. Las técnicas se podrán aplicar sin la necesidad de utilizar sistemas de monitorización de altas prestaciones, y por tanto, de elevado coste, al mismo tiempo que evitan la generación de una cantidad ingente de datos. Además de las variables a

monitorizar y los parámetros estimados a partir de estas últimas, en las técnicas propuestas se deben definir los intervalos de registro recomendables para garantizar una adecuada precisión y exactitud de las medidas. Una adecuada monitorización no sólo permitirá realizar un mejor análisis de funcionamiento, sino que los datos obtenidos también se pueden utilizar para mejorar el dimensionado de los diferentes componentes de los sistemas fotovoltaicos, para su mejor adaptación a los objetivos y necesidades de las diferentes aplicaciones planteadas. En ese sentido, las técnicas desarrolladas en esta Tesis permiten medir la potencia del generador fotovoltaico en sistemas fotovoltaicos con reguladores PWM tanto tipo serie como paralelo, así como la energía proporcionada por el mismo con un error inferior al 2%.

Por otro lado, y para el caso de los sistemas fotovoltaicos de autoconsumo, se ha evaluado cómo influye el uso de diferentes registros de almacenamiento (1 min, 10 min, 15 min, 30 min y 1 hora) así como diferentes periodos de análisis (diario, mensual y anual) en la estimación de la energía fotovoltaica autoconsumida a partir de los perfiles de consumo de la vivienda y el de la potencia proporcionada por el generador fotovoltaico. Los resultados muestran que cuando el intervalo de registro aumenta, se produce una sobreestimación de la energía fotovoltaica autoconsumida y, por ende, de los índices de autoconsumo y autosuficiencia. Sin embargo, la sobreestimación empleando periodos de análisis anuales frente análisis diarios se ve notablemente suavizada. De acuerdo con esto, se pretende definir un intervalo de registro adecuado que garantice la precisión y exactitud de la estimación de la energía solar fotovoltaica autoconsumida.

Así mismo, una buena estimación de la energía fotovoltaica autoconsumida con datos monitorizados permite abordar métodos de diseño que optimicen el tamaño del generador fotovoltaico según los objetivos y necesidades de la aplicación. En consecuencia, y para los sistemas fotovoltaicos de autoconsumo se han planteado dos estrategias para dimensionar el generador fotovoltaico: siguiendo un criterio competitivo en costes de la energía eléctrica generada en comparación con el coste del precio de la electricidad del mercado en el sector residencial, a la vez que se maximiza la energía fotovoltaica autoconsumida y otro criterio de rentabilidad económica donde se maximiza el valor actual neto. Los resultados obtenidos de ambos métodos aplicados en el sur de España sugieren que los sistemas de autoconsumo fotovoltaico residencial en España puede ser una inversión no solo viable para futuros propietarios sino también rentable.

Abstract

One of the technological challenges faced by society is to change the way we use of energy resources. It means using clean and efficient renewable energies which respect the environment and provide the highest possible percentage of energy consumption. Photovoltaic (PV) systems are both, an economical and technological alternative, which may play a key role in the transition towards a low carbon economy. In this sense, it is essential to use methods which allow to evaluate the performance analysis from the measured data in order to study the viability and durability of PV system. These measured data may be of great interest because they are used in PV performance analysis of different PV system configurations and they may also be used to evaluate whether design expectations and guarantees have been achieved.

Pulse width modulation (PWM) signals, which are generated by PWM charge controllers in stand-alone photovoltaic (SAPV) systems, are not easy to measure. Due to the nature of PWM signals, data acquisition systems (DAS), which can measure simultaneous sampling and high sampling frequency are required. These DAS are usually sophisticated and expensive. However, the solution may be disproportionate considering the relatively low cost of the systems to be monitored. Therefore, a change in approach is needed to address new monitoring techniques without using sophisticated and expensive monitoring systems; moreover, the cost of DAS should be appropriate to the relative low cost of SAPV systems and the accuracy of measurement should be adequate.

On the other hand, a significant source of error in monitoring of photovoltaic systems may also be found when energies are estimated, due to sampling and recording intervals. Estimated energies are not only used in energy balances in order to evaluate the performance analysis, but they also influence the economic parameters, such as, the case of estimated photovoltaic self-consumed energy in self-consumption energy systems, because the estimated energy is an input parameter in order to evaluate economic and technical aspects.

The aim of this doctoral thesis is to provide solutions for different aspects in the monitoring of photovoltaic systems, especially the stand-alone and self-consumption systems. New and simple monitoring techniques have been developed for SAPV systems. They will estimate the parameters of signals which are generated by a PWM charge controller and they will provide the PV array direct current (DC) output power and PV array DC output energy. Thus, sophisticated data acquisition systems and a huge number of collected data could be avoided by the use of the proposed techniques. The techniques should give the variables to be monitored and the estimated parameters from measurements. In addition, the proposed techniques should be defined in the adequate recording intervals in order to ensure high accuracy. An adequate monitoring will not only allow a better performance analysis, but the measured data may also be used to improve the design of different elements of the photovoltaic systems. The proposed monitoring techniques allow to measure the PV array output power in stand alone photovoltaic systems with PWM charge controllers with errors lower than 2%.

Additionally, and in the case of self-consumption photovoltaic systems, different recording intervals (1 min, 10 min, 15 min, 30 min and 60 min) and reporting periods (daily and annual) have been evaluated in the estimation of self-consumed photovoltaic energy from the load consumption and the photovoltaic generation profiles. The results

show that when the recording intervals are higher, there is an overestimation of the self-consumed photovoltaic energy, self-consumption and self-sufficiency indexes. However, the averaging effect is smoothed when the reporting period is annual, providing the same recording interval is used. A suitable recording interval, which provide high accuracy of the estimated self-consumed photovoltaic energy, will be defined.

In this sense, an estimation of self-consumed energy with high accuracy through monitored parameters allow to address design methods that could optimize the size of the photovoltaic array, according to the objectives and needs of the application. Therefore, two methods have been proposed for sizing the photovoltaic generator: a method to size the generator for a PV self-consumption system based on cost-competitiveness, maximizing direct self-consumption, and a method to size the PV generator in a PV self-consumption system which maximizes the net present value (NPV). The results obtained in both methods show that residential PV self-consumption systems may not only be a feasible investment but can lead to profitability for future owners of these systems.

Tabla de contenidos

Agradecimientos	11
Resumen.....	13
Abstract	15
Tabla de contenidos	17
Estructura de la memoria.....	19
Parte I: Memoria	21
1. Introducción	23
2. Justificación	27
3. Objetivos	31
4. Publicaciones.....	33
4.1 Objetivo específico 1	33
4.2 Objetivo específico 2	35
4.3 Objetivo específico 3	36
4.4 Objetivo específico 4	38
4.5 Objetivo específico 5	39
5. Conclusiones	43
6. Conclusions and future research lines.	47
7. Referencias	51
Parte II: Compendio de trabajos publicados	57
1. Relación de publicaciones	59
2. Artículos indexados JCR generados en el marco de la tesis.....	163
3. Comunicaciones a congresos y conferencias internacionales	165

Estructura de la memoria

En esta memoria se presentan los resultados obtenidos durante la realización de la Tesis Doctoral titulada '*Contribución a la monitorización y análisis del funcionamiento de sistemas fotovoltaicos*'. La memoria está compuesta por dos partes principales. En la primera se presenta una introducción que pretende contextualizar la unidad temática de la tesis, así como la justificación de la misma. A continuación, los principales objetivos a alcanzar son propuestos. Posteriormente, se aborda una discusión de los resultados obtenidos por cada objetivo. Por último, se muestran las conclusiones de mayor interés y las futuras líneas de investigación. La segunda parte se estructura como un compendio de cinco trabajos de investigación. Tres de los trabajos han sido publicados y se encuentran incluidos en dentro de las revistas consideradas de la alta relevancia (primer y segundo cuartil) del Journal Citation Report® (JCR). Además, se incluye un acta de congreso que ha sido aceptada y un artículo que está bajo revisión en una revista científica de calidad reconocida. Es importante mencionar que los trabajos de la segunda parte el orden que se presentan en la memoria puede no coincidir con el orden cronológico.

Parte I: Memoria

En la parte I se realiza una breve introducción de la situación actual de la energía solar fotovoltaica donde se contextualiza los sistemas fotovoltaicos autónomos y de autoconsumo. A continuación, se exponen los principales problemas encontrados en la monitorización que se enfrentan actualmente ambos sistemas para realizar un análisis de funcionamiento y un dimensionado de este tipo de configuraciones, por tanto, las oportunidades que justifican el desarrollo de la tesis. Además, se especifican los objetivos planteados. Posteriormente, se realiza una discusión íntegra de los resultados obtenidos. Finalmente, se presentan las conclusiones de mayor interés y las futuras líneas de investigación.

1. Introducción

En un contexto global de cambios en la economía y los avances tecnológicos, la sociedad actual se enfrenta a desafíos en los que es de suma importancia tener presente no solo la competitividad sino también el desarrollo sostenible. Una forma de combinar ambos factores ante un desafío es buscar un desarrollo endógeno, potenciando las fortalezas intrínsecas de cada región para mejorar su economía.

Asegurar un futuro sostenible implica que se deben abordar los problemas ambientales a los que se enfrenta la sociedad. El desafío de la transición energética es uno de los grandes retos sociales que Europa se ha planteado y está abordando. En este nuevo escenario, la generación energética debe realizar una transición de las energías de origen fósil a las energías renovables. En este sentido, el acceso a la energía segura, limpia y de manera eficiente se encuentra dentro de las primeras prioridades de los retos sociales que se han desarrollado en el programa H2020 dentro del Marco de Investigación e Innovación de la Unión Europea [1].

El acceso a los servicios energéticos de manera fiable es esencial para el desarrollo económico de un lugar y para el bienestar humano [2–4]. En este sentido, las Naciones Unidas ha planteado dentro de sus Objetivos de Desarrollo Sostenible el objetivo 12, que persigue: “fomentar el uso eficiente de los recursos y la energía, la construcción de infraestructuras que no dañen el medio ambiente, la mejora del acceso a los servicios básicos y la creación de empleos ecológicos, justamente remunerados y con buenas condiciones laborales” [5]. Por tanto, la sociedad también se enfrenta al reto tecnológico que permita modificar la tendencia del uso de los recursos energéticos, es decir, utilizar energías renovables limpias y eficientes, que respeten al medio ambiente y que tengan la capacidad de cubrir el mayor porcentaje posible de consumo energético.

Aumentar la proporción en el mix generación eléctrica mediante energías renovables un 20%, así como mejorar la eficiencia energética están dentro de los objetivos marcados en el “Horizonte 2020” de la Unión Europea [6]. Actualmente, las energías renovables han demostrado ser energías fiables, y pueden ser claves en el futuro escenario energético mundial. Hay una gran variedad de energías renovables que tienen un elevado grado de madurez tanto desde el punto de vista técnico, como el económico, consiguiendo que sean competitivas en costes si se comparan con las energías tradicionales [7].

Así mismo, se estima que más de mil millones de personas en el mundo viven sin acceso a la electricidad, de los cuales en su mayoría se encuentran en lugares en vía de desarrollo, y que a su vez más de la mitad de esta población vive en regiones rurales donde no existe acceso a la red eléctrica y se requiere grandes inversiones para instalar redes eléctricas de transmisión y distribución [8]. Aunque se está realizando grandes esfuerzos en ampliar las redes eléctricas para la electrificación rural, hay casos en los que la inversión económica y el impacto ambiental puede ser tan importante que es necesario proporcionar el acceso a la energía eléctrica a través de otros medios.

Actualmente, la energía fotovoltaica puede ser considerada como una de las energías cuya fuente de energía primaria se encuentra con mayor disponibilidad sobre todo el planeta [9]. Por tanto, en los lugares remotos que se encuentren lejos de los sistemas convencionales de generación energética y además se requiera una alta inversión para extender las redes de distribución eléctrica, la energía solar fotovoltaica puede desarrollar un papel fundamental [10]. Una posible solución para la electrificación rural son los sistemas fotovoltaicos autónomos [11,12], ya que estos que pueden proporcionar la

energía que satisfaga las necesidades energéticas demandadas por un gran número de aplicaciones, y por tanto se pueda promover el desarrollo de una gran cantidad de sectores fundamentales, desde la educación hasta la sanidad [13–15]. África, Asia y América tienen el mayor potencial de necesidades energéticas fuera de la red, por lo tanto se espera que el mercado de los sistemas fotovoltaicos autónomos experimente un incremento durante la próxima década en estos continentes [16].

Los sistemas no conectados a la red eléctrica han sufrido un gran crecimiento durante estos últimos años. En el año 2015 se estimó que los sistemas solares domésticos (SHSs, solar home systems), un tipo de sistemas fotovoltaicos autónomos, contaba con más de seis millones de instalaciones en las ciudades en vías de desarrollo [17] y en el año 2016 había más de 133 millones de usuarios que tenían acceso a los servicios eléctricos y lumínicos gracias al uso de soluciones tecnológicas basadas en energías renovables, de los cuales 24 millones de usuarios utilizaban sistemas solares domésticos, y 9 millones están conectados a través de mini-redes eléctricas [18]. Los sistemas fotovoltaicos autónomos son sistemas descentralizados que están sufragando la brecha de acceso a la energía en áreas remotas para proporcionar electricidad y se espera un escenario en el que aproximadamente 195 millones de personas tenga acceso a energía principalmente a través de sistemas de estos sistemas para el año 2030 [19]. Este gran crecimiento se ha visto motivado por una caída del 81 % de los precios de los módulos fotovoltaicos si se compraran el precio que tenían los módulos desde finales del 2009 a finales del 2017 [20], así como la reducción del precio de algunas tecnologías de baterías, como es el caso de las de ion litio que han bajado un 79% si se comparan los precios del 2018 con los del 2010 y se espera una bajada del 67% de los precios actuales con respecto a los precios del 2030 [21].

La reducción de costes de los elementos que componen los sistemas fotovoltaicos están permitiendo una mayor penetración en el mix mundial generación eléctrica, se pronostica que para el año 2050 represente el 16% dentro del mix [22]. La integración de la generación solar fotovoltaica con el almacenamiento usando baterías da como resultado que el perfil de generación y de demanda puedan tener un mejor acoplamiento y ajuste puesto que la energía solar fotovoltaica puede satisfacer la demanda de electricidad, mientras que las baterías pueden absorber el exceso de generación y utilizar esa energía cuando no haya sol. En este sentido, se ha producido un crecimiento de los sistemas fotovoltaicos instalados en los edificios con tamaños del generador fotovoltaico menores a 10kWp [23,24], e incluso se ha producido un interés por algunos usuarios de “vivir fuera de la red eléctrica” o “salir de la red eléctrica” [25].

La Unión Europea para fomentar el desarrollo sostenible también persigue reducir el consumo de energía. No obstante, los pronósticos estiman que a nivel mundial habrá un crecimiento de la demanda energética y esta aumentará un 170% en año 2050 si se compara con los datos del año 2016, esperándose que alcance su máximo a mediados de la tercera década del siglo XXI [26]. Actualmente, el consumo energético en el sector comercial y edificios residenciales representan el 40% del consumo energético total de la Unión Europea [27] y sobre el 55% del consumo eléctrico [28]. Esta demanda energética en el sector residencial se estima que es la causante del 24% de las emisiones de los gases de efecto invernadero a la atmósfera [29]. En países como Estados Unidos el consumo energético en los edificios residenciales es muy similar a los de Europa [30] mientras que países como China este porcentaje es alrededor del 28%, aunque se espera un gran crecimiento [31]. A nivel mundial, en el sector residencial se espera un crecimiento anual del 0.7% y constituirá el 30% de la demanda energética mundial para el año 2050 [26].

La industria y los edificios residenciales contribuyen de manera mayoritaria en el consumo global de la energía en el usuario final, y, por tanto, ambos pueden desarrollar un papel fundamental en la transición energética. Dentro de las políticas europeas se están promoviendo la mejora de sostenibilidad con la implementación de generación energética con fuentes renovables con el fin de promover edificios con balance energético cercano a cero (del inglés, nZEBs, Nearly Zero Energy Building). En este sentido, se estableció que para el año 2021 los nuevos edificios de los estados miembros de la Unión Europea deberían ser edificios nZEBs [32]. El concepto nZEBs busca la reducción de la energía consumida en los edificios y promueve el uso de energías renovables [33]. En este tipo de instalaciones las energías solar térmica y fotovoltaica pueden jugar un papel importante [34].

El desarrollo de los sistemas fotovoltaicos de autoconsumo proporciona a los consumidores el acceso a energías renovables reduciendo las necesidades de la red eléctrica. Además, es una tecnología respetuosa con el medio ambiente que contribuye a que se reduzcan las emisiones de efecto invernadero a la atmósfera. Tampoco se debe olvidar que la transición energética producirá puestos de trabajos como ya se ha demostrado en algunos países.

La modularidad, junto con su madurez tecnológica y la disponibilidad del recurso solar son las características que convierten a la tecnología fotovoltaica en una opción viable para la generación de energía renovable tanto para cubrir parte del consumo residencial en zonas con acceso a la red eléctrica como para garantizar el acceso a la energía eléctrica en lugares remotos sin presencia de la red. La modularidad permite realizar diseños que puedan adaptar el tamaño del sistema fotovoltaico según la aplicación a la que se orienta. El diseño de instalaciones del tamaño necesario y la adaptación de las curvas de generación a las curvas del consumo eléctrico hacen posible una mejor correlación entre la producción y el consumo, mejorando la sobrecapacidad que suelen tener las grandes instalaciones. Los usuarios con sistemas fotovoltaicos pueden auto-producir y auto-consumir la propia energía generada en el sitio. Con ello, se consigue una producción descentralizada donde la red eléctrica es usada para inyectar a la red aquellos excedentes de energía generada por los sistemas fotovoltaicos que no se consumen y de manera opuesta, cuando la generación es menor que la demanda la energía, esta demanda puede ser obtenida de la red eléctrica.

El coste de los sistemas fotovoltaicos utilizados en edificios residenciales también han sufrido una reducción en torno al 47-78% desde 2007 al 2017 [35]. Además, las tecnologías comerciales de monocristalino y de policristalino han sufrido un aumento de eficiencias medias desde valores del 12% a valores entre 17-17.5% durante la última década [35]. Esto ha ayudado a que se registre un crecimiento exponencial de la potencia acumulada de sistemas fotovoltaicos conectados a red instalada en el mundo a finales del año 2017 fue de 403 GW [36], donde la capacidad instalada solo en el año 2017 creció un 33% [37]. Se debe tener en cuenta que este valor puede ser un poco superior debido a la dificultad de seguimiento sobre las instalaciones que presentan los sistemas fotovoltaicos que no están conectados a la red [37]. Este crecimiento en potencia acumulada viene acompañado con un crecimiento en inversiones donde la energía solar junto la energía eólica representaron el 90% de la inversiones que se produjeron energías renovables [20]. Se espera que ambas tecnologías sean las principales fuentes de energía en términos de inversiones durante los próximos años, con aproximadamente 140 mil millones € por año [38].

En ambos sistemas, tanto los sistemas fotovoltaicos autónomos como los sistemas fotovoltaicos de autoconsumo conectados a la red, el análisis de funcionamiento en condiciones reales puede depender de los efectos de las estaciones, de la calidad de los elementos de los sistemas y de las condiciones climáticas locales, como es la temperatura ambiente, la humedad relativa, la radiación solar, etc. [39,40]. También, la cantidad de energía que producen los sistemas fotovoltaicos pueden verse influenciados por la degradación de los sistemas y el mantenimiento. Las operaciones de mantenimiento juegan un papel importante para analizar la vida útil y para evaluar la viabilidad de los sistemas fotovoltaicos [41]. En este sentido, la monitorización de los sistemas fotovoltaicos permiten mejorar el mantenimiento preventivo [42].

Una vez diseñados e implementados los sistemas fotovoltaicos, para garantizar la fiabilidad y verificar que se cumplen los objetivos inicialmente planteados, es necesario monitorizar y evaluar el funcionamiento de los sistemas. Estos sistemas de monitorización deben proporcionar información detallada, sencilla y rápida del funcionamiento de la instalación. Es de suma importancia es adoptar un modelo con criterios comunes referente al número de parámetros a monitorizar, el formato de los datos recogidos y el método de análisis a seguir. Ya que estos sistemas incrementan el coste de la instalación, y a mayores prestaciones técnicas, tales como la precisión, capacidad de almacenaje o protocolos de comunicación, mayor es el coste de estos instrumentos. No obstante, no es suficiente con la correcta elección de estos equipos, sino también es necesario la correcta interpretación de los datos que proporcionan para detectar posibles fallos, evaluar la eficiencia del sistema y su comportamiento, así como ayudar a una correcta toma de decisiones para la realización de las acciones preventivas y correctivas necesarias de los sistemas fotovoltaicos.

2. Justificación

Para que los sistemas fotovoltaicos tengan éxito a lo largo de su vida útil es fundamental asegurar el correcto funcionamiento de los mismos garantizando fiabilidad y un rendimiento adecuado. Estos desafíos se pueden alcanzar a través de una adecuada monitorización que permita obtener y evaluar los diferentes parámetros que determinan el funcionamiento de este tipo de sistemas así como la detección de fallos en el menor tiempo posible [43].

Una monitorización adecuada mejoraría el mantenimiento preventivo al permitir realizar diagnósticos de funcionamiento en tiempo real; en este sentido, el número de averías podría reducirse y los sistemas podrían ofrecer un mayor número de horas operativas y con ello conseguir un aumento del rendimiento del sistema, lo que se traduciría en una mayor cantidad de la energía generada.

Los sistemas de adquisición de datos (DAS, Data acquisition system) son utilizados para realizar una adecuada monitorización de determinadas variables que deben ser medidas que, junto con los parámetros derivados de estos, ofrecen una información que puede ser cuantificada y evaluada para analizar si el sistema que está siendo monitorizado funciona correctamente. También este conjunto de variables y parámetros estimados puede ayudar a mejorar futuros diseños de los sistemas fotovoltaicos, así como evaluar el potencial que tiene esta tecnología. En este sentido, en los sistemas fotovoltaicos los DAS son ampliamente utilizados para monitorizar los parámetros que permiten determinar los balances energéticos [44], predicciones energéticas [45,46], así como realizar un análisis de funcionamiento bajo condiciones reales climatológicas [47–49]. Los parámetros monitorizados, además de detectar anomalías en el funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos, han permitido detectar que algunos sistemas no habían sido diseñados idóneamente. En este sentido, gracias a la monitorización y al análisis de los datos se han detectado sistemas fotovoltaicos autónomos que estaban sobredimensionados en más de un 40% en relación a las necesidades reales [50]. Así mismo, se han encontrados sistemas que no funcionan correctamente, especialmente en los sistemas fotovoltaicos autónomos en proyectos de electrificación rural: ejemplos de esto son los encontrados en el proyecto Zacapa en Guatemala donde el 45% de los sistemas fotovoltaicos autónomos instalados no estaban operativos [51]; de manera similar, en Laos se detectó también en un proyecto de electrificación rural en el que el 65% de los sistemas no funcionaban correctamente [52]; también en Tailandia se detectaron que el 50% de los principales componentes estaban dañados [53]; en Fiji alrededor del 80% de los sistemas fotovoltaicos instalados tenían algún tipo de anomalía en el funcionamiento [54]. Diversos factores pueden ser los causantes de estos malfuncionamientos, posiblemente la escasez de mantenimiento causada principalmente por la ausencia de monitorización y de profesionales capacitados. Se debe tener en cuenta que son instalaciones en áreas rurales en países en vía de desarrollo y que las instalaciones se realizaron con proyectos o iniciativas sociales que puede que no tuvieran en cuenta los presupuestos para un seguimiento y mantenimiento de la instalación. No obstante, este tipo de situaciones se puede reducir promoviendo el empleo de la monitorización de los sistemas fotovoltaicos para que los datos generados ayuden a garantizar su funcionamiento [55] así como determinar si el sistema fotovoltaico está operando de acuerdo a lo esperado [56].

El diseño e implementación de un sistema de monitorización de un sistema fotovoltaico exige conocer y determinar previamente las señales que se quieren monitorizar así como los requisitos que se deben satisfacer según las exigencias de los

estándares vigentes. En este análisis no solo es suficiente con la elección del sistema de adquisición de datos y sensores, sino que se deben tener en cuenta las técnicas de monitorización a utilizar [57]. En este sentido, en el año 2017 el comité técnico de la Comisión Internacional Electrotécnica (IEC, International Electrotechnical Commission) lanzó el estándar Internacional 61724-1[56], el cual es una revisión del previo IEC 61724 que fue publicado en el 1998.

Este estándar establece una clasificación de los sistemas de monitorización en función del tamaño de estos y de los objetivos de los usuarios: alta, media y básica. Según esta clasificación se requiere una exactitud y precisión por parte del sistema de monitorización. Para los sistemas fotovoltaicos autónomos y los sistemas fotovoltaicos de autoconsumo en el sector residencial la mejor opción podría ser una exactitud y precisión media o básica. Los sistemas de monitorización con esta clasificación media o básica requieren un intervalo de muestreo, definido como el tiempo entre muestras, de al menos un minuto. Sin embargo, este intervalo de tiempo para los sistemas fotovoltaicos autónomos que utilicen reguladores PWM es demasiado grande debido a las peculiaridades de las señales que utilizan este tipo de sistemas. Por tanto, los sistemas fotovoltaicos que usan reguladores PWM *requieren* especial atención en las medidas si se quiere alcanzar una precisión y exactitud adecuada [58]. De acuerdo al Anexo A del estándar IEC 61724-1 se recomienda que para las señales que cambian rápidamente con el tiempo, como serían las señales que generan los reguladores PWM, el intervalo de muestreo se defina en función de la frecuencia principal de la señal y que esta debe ser al menos 200 veces esta última para obtener una precisión y exactitud de la señal reconstruida de un 1% [56]. Por el contrario, si no se tiene en cuenta la forma y las peculiaridades de estas señales y no se muestrea con un intervalo adecuado y no se emplea un intervalo de registro de los datos correcto se pueden cometer errores tanto en las medidas de la corriente y tensión [59] y, por ende, en la potencia y en la estimación de la energía [44,55]. Los principales reguladores serie y paralelo comerciales tiene una frecuencia principal comprendida entre diez y unos pocos de cientos de hercios [59]. Aunque principalmente los reguladores PWM se encuentran más extendidos en los sistemas fotovoltaicos autónomos, existen inversores híbridos comerciales que entre sus elementos cuentan con un regulador PWM para cargar la batería con el fin de conseguir precios más reducidos.

Otro posible problema a considerar en la monitorización de sistemas con señales PWM son los parámetros calculados a través de los parámetros medidos, como es el caso de la potencia. La potencia es calculada a través de las medidas de la tensión y la corriente, y por tanto, se requiere que sean medidas simultáneas o, en caso contrario, se pueden obtener resultados erróneos [55].

No obstante, los problemas descritos anteriormente se pueden evitar si se selecciona un intervalo de muestreo adecuado con un DAS avanzado (sensores, transductores, tarjeta de adquisición de datos, circuitos electrónicos de adaptación de señales, sistemas de memoria...) que permita sincronizar las señales de la tensión y de la corriente a la frecuencia requerida. Sin embargo, el coste de estos sistemas puede ser elevado si se tiene en cuenta el bajo coste relativo de los sistemas fotovoltaicos autónomos [50]. En ese sentido, surge la necesidad de un cambio de enfoque para abordar la monitorización de este tipo de sistemas garantizando la precisión y exactitud requeridas en las medidas, pero sin necesidad de utilizar sistemas de monitorización de altas prestaciones.

Para abordar la problemática anteriormente indicada, diferentes métodos han sido propuestos para el análisis de funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos autónomos

con reguladores de carga PWM. Muñoz et al. propusieron un método de análisis empleando parámetros de carga en vez de energía [44]. El método consiste en una adaptación de los parámetros de energía que proporciona el estándar IEC 61724 a parámetros de carga. El método propuesto permite estimar los parámetros de carga a partir de las medidas de corrientes en los sistemas fotovoltaicos autónomos sin necesidad de utilizar DAS complejos que realicen muestreos simultáneos y empleando un intervalo de muestreo de un minuto. También para la utilización de este método se recomienda que para las medidas de corriente de las diferentes partes que componen el sistema fotovoltaico autónomo se utilicen transductores de efecto DC Hall en vez de resistencias Shunt, con el objeto de garantizar una exactitud y precisión adecuadas [59]. No obstante, este método no satisface todos los requisitos y objetivos que persigue el estándar IEC 61724-1. El método no permite estimar todos los parámetros necesarios para un adecuado análisis de funcionamiento de este tipo de sistemas al mismo tiempo que podría dificultar la comparativa de resultados con los sistemas fotovoltaicos autónomos con regulador de carga con seguidor del punto de máxima potencia, y cuyo análisis se desarrollaría con parámetros de energía en vez de cantidad de carga. Por otro lado, Williams et al. propusieron también dos técnicas de monitorización para la estimación de la potencia que solo es posible aplicarlo en los sistemas fotovoltaicos autónomos con reguladores PWM del tipo paralelo [55]. Las dos técnicas que propusieron detectaron errores porcentuales de la potencia en el generador fotovoltaico entre el 5%-18% cuando el factor de trabajo de la señal PWM generada por el regulador era menor a 0.6. De todo lo anteriormente mencionado surge la necesidad de buscar una alternativa que pueda satisfacer los requisitos y los objetivos del estándar IEC 61724-1 para ambas tipologías de regulador de carga: serie y paralelo y obtener la medida de la potencia del generador fotovoltaico con la mejor exactitud y precisión posible y, por tanto, conseguir una estimación veraz de la energía ofrecida por el mismo.

Disponer de una buena estimación de la energía entregada por el generador fotovoltaico a partir de los datos monitorizados permite realizar un buen análisis desde el punto de vista energético, y sus efectos no solo se ven reflejados en el aspecto técnico sino que también repercuten en el económico, debido a que la energía es un parámetro utilizado para el cálculo del coste de la energía eléctrica (LCOE, levelised cost of electricity) y a los costes de inversión. En este sentido, la estimación de la energía fotovoltaica autoconsumida es un dato de utilidad tanto para el análisis de funcionamiento como para el diseño de sistemas fotovoltaicos de autoconsumo conectados a la red. Así mismo, este parámetro también es de utilidad para evaluar estos sistemas desde un punto de vista económico sobre todo si tiene algún tipo de medición del balance energético neto [60]. La estimación de la energía solar fotovoltaica autoconsumida depende de las medidas y/o estimaciones de la potencia demandada por la carga y de la potencia generada por el sistema fotovoltaico [61]. Se han detectado sobreestimaciones de hasta el 69% en la estimación de la energía autoconsumida en función del intervalo de registro y el periodo de análisis de los parámetros monitorizados [60,62–66]. Sin embargo, estos análisis se han centrado bien en periodos de análisis de días aislados o cuando han sido periodos de análisis de un año solo se ha analizado un sistema fotovoltaico único con una potencia concreta de generador fotovoltaico. En este sentido, surge la necesidad de analizar el efecto del intervalo de registro en la estimación de energía fotovoltaica autoconsumida considerando diferentes periodos de análisis: diarios y anuales y en el rango típico de potencias de sistemas fotovoltaicos de los edificios residenciales.

Una vez analizado el efecto del intervalo de registro y el periodo de análisis sobre el cálculo de la energía fotovoltaica autoconsumida a partir de datos monitorizados, es de

gran interés mostrar la utilidad de esta última para abordar soluciones *ad hoc* en el diseño de sistemas fotovoltaicos de autoconsumo. Por este motivo, en la presente Tesis se van a plantear diferentes métodos de diseño del sistema fotovoltaico de autoconsumo que tengan en cuenta tanto parámetros técnicos como el consumo, la energía generada y autoconsumida así como parámetros financieros y económicos.

En este sentido, hay varios estudios de investigación que abordan diferentes formas de dimensionar los sistemas fotovoltaicos de autoconsumo considerando aspectos económicos [67–71]. En una de ellas, varios perfiles de consumo fueron estudiados para simular el tamaño óptimo de cada elemento del sistema fotovoltaicos para minimizar el coste de la energía generada [67]. Por otro lado, en otro estudio se propuso un método para dimensionar el tamaño del generador fotovoltaico con baterías que optimizara el coste del sistema. Además, para este método un análisis tecno-económico fue llevado a cabo para determinar la solución más ventajosa según criterios económicos [68]. Desde otro punto de vista, una optimización tecno-económica fue presentada para el caso de viviendas alemanas, en este método se persigue la rentabilidad económica. El objetivo del método propuesto se basa en maximizar el NPV para flujos de energía en intervalos de tiempo de 15 minutos [71]. Un modelo de simulación tecno-económico fue desarrollado para estimar el sistema fotovoltaico óptimo considerando perfiles de consumo eléctricos heterogéneos, al igual que el anterior caso, este modelo también se basa en maximizar la rentabilidad según el criterio del NPV, sin embargo en este caso el intervalo de registro que emplearon fue de 30 minutos [69]. Con datos horarios de consumo de las viviendas del área urbana de Helsinki, se ha calculado el NPV para analizar los retornos absolutos de la rentabilidad económica [70]. Sin embargo, todos los métodos que se han analizado por los diversos autores utilizan datos de entrada con intervalos de registro superiores a un minuto: todos ellos son mayores a 15 minutos. Así mismo, los métodos propuestos no permiten realizar un análisis exhaustivo en función de la potencia del generador fotovoltaico. Es decir, no muestran como resultado los índices de autoconsumo y los índices de autosuficiencia frente a la potencia del generador fotovoltaico junto con los resultados del parámetro económico considerado. Este aspecto no solo dificulta obtener el resultado óptimo, sino también analizar para qué potencias el generador fotovoltaico puede ser competitivo en costes y/o rentables. Por tanto, con lo expuesto anteriormente y con una gran expectativa de crecimiento de los sistemas fotovoltaicos de autoconsumo, surge la necesidad de proponer nuevos y originales métodos que analicen desde diferentes perspectivas económicas: competitivos en costes de generación eléctrica y/o rentables, y que se ajusten a las necesidades energéticas de la vivienda. Es decir, analizar y obtener aquel tamaño del generador fotovoltaico que satisface un determinado requisito energético (i.e. índices de autosuficiencia y autoconsumo) y al mismo tiempo cumple con las expectativas económicas planteadas. Si los métodos que se proponen tienen como entrada datos reales del consumo de la vivienda se puede optimizar el generador a las necesidades específicas de la aplicación. También en los métodos planteados se deben analizar todos aquellos parámetros principales que hacen sensibles al tamaño del generador fotovoltaico y los objetivos económicos, como puede ser el caso de la elección de la tarifa eléctrica.

3. Objetivos

El objetivo principal de esta tesis es la mejora del conocimiento de los métodos y las técnicas de monitorización de los sistemas fotovoltaicos autónomos y de autoconsumo con el fin de mejorar los métodos de análisis de funcionamiento y dimensionado de este tipo de configuraciones. Para alcanzar el objetivo indicado se desarrollarán técnicas de monitorización adaptadas a las particularidades de este tipo de sistemas y en las que se definirán las variables a monitorizar y los parámetros derivados a partir de estas últimas, así como el intervalo de registro recomendable para conseguir una estimación con una adecuada precisión y exactitud. Una adecuada monitorización no solo repercutirá en un mejor análisis de funcionamiento de estos sistemas sino también permitirá que los resultados obtenidos se puedan utilizar para mejorar el dimensionado de los diferentes componentes que conforman estos sistemas dando soluciones particularizadas (e.g. a partir de los perfiles de consumo). En este sentido, y para alcanzar el objetivo anteriormente indicado se han definido los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollar técnicas de monitorización para la medida de la corriente y tensión del generador fotovoltaico en sistemas fotovoltaicos autónomos con reguladores PWM (serie y paralelo). Se pretende proporcionar técnicas para obtener los parámetros (factor de trabajo, niveles alto y bajo) de las formas de onda de la corriente y de la tensión del generador fotovoltaico cuando el regulador PWM (serie y paralelo) esté en la fase PWM.
- Desarrollar técnicas de monitorización de la potencia del generador fotovoltaico y de la estimación de la energía entregada por este último en los diferentes tipos de sistemas fotovoltaicos autónomos con reguladores PWM (serie y paralelo). Se pretende analizar los métodos de monitorización del generador fotovoltaico existentes para los sistemas fotovoltaicos autónomos con reguladores PWM y se desarrollará una propuesta que pueda satisfacer los requisitos y las recomendaciones de la normativa sin que el coste del sistema de monitorización sea desmesurado en comparación del coste total del sistema fotovoltaico autónomo.
- Analizar la influencia del intervalo de registro y del periodo de análisis en la estimación de la energía fotovoltaica autoconsumida en los sistemas fotovoltaicos de Autoconsumo. Se pretende estudiar el impacto al utilizar los datos de entrada de la radiación solar y la potencia de consumo de una vivienda adquiridos con un determinado intervalo de registro u otro para la estimación de la energía fotovoltaica autoconsumida, así como el efecto que se puede producir debido al periodo de análisis seleccionado.
- Definir y analizar métodos de dimensionado de sistemas fotovoltaicos de autoconsumo en viviendas residenciales a partir de datos monitorizados de consumo. Se pretende conseguir que el coste de la electricidad generada por el sistema sea competitivo comparado con el precio de la electricidad de la red eléctrica, maximizando la energía fotovoltaica autoconsumida. A partir de los resultados obtenidos en el objetivo 3, se utilizarán datos de consumo e irradiación obtenidos con intervalo de almacenamiento y un periodo de análisis adecuado.
- Definir y analizar métodos de dimensionado a partir de los datos monitorizados de sistemas fotovoltaicos de autoconsumo siguiendo un enfoque de

rentabilidad económica. Para ellos se parte del perfil de consumo de una vivienda que haya sido monitorizada y los datos de radiación del lugar en función de los resultados obtenidos en el objetivo 3, se pretende optimizar el tamaño del generador fotovoltaico que maximice el valor neto actual NPV.

4. Publicaciones

A continuación, se presenta el conjunto de trabajos que se han desarrollado dentro del marco de la presente tesis y que han permitido alcanzar los objetivos específicos expuestos anteriormente.

4.1 Objetivo específico 1

El primer objetivo específico, '*Desarrollar técnicas de monitorización para la medida de la corriente y tensión del generador fotovoltaico en sistemas fotovoltaicos autónomos con reguladores PWM*', ha sido abordado en las siguientes publicaciones:

- G. Jiménez-Castillo**, F.J. Muñoz-Rodríguez, C. Rus-Casas, J.C. Hernández, G.M. Tina,
 [1] Monitoring PWM signals in stand-alone photovoltaic systems, *Measurement*. 134 (2019) 412–425. doi:10.1016/j.measurement.2018.10.075
- G. Jiménez-Castillo**, F.J. Muñoz-Rodríguez, C. Rus-Casas, P.G. Vidal, Improvements in
 [2] array power monitoring in Pulse-Width Modulation charge controllers, *Sensors*. 19 (2019) 2150. doi:10.3390/s19092150.

En la primera publicación se desarrolla la técnica de monitorización para sistemas fotovoltaicos autónomos con reguladores serie con PWM. Mientras en la segunda publicación se ha aplicado la técnica a los reguladores del tipo paralelo con PWM. Ambas técnicas permiten estimar diferentes parámetros asociados a las formas de onda de la corriente y de la tensión del generador fotovoltaico sin necesidad de realizar medidas simultáneas y con la posibilidad de emplear un intervalo de muestreo de sólo un minuto y, por tanto, sin generar una cantidad ingente de datos. En este sentido, con las técnicas propuestas se puede evitar el empleo de sistemas de adquisición de datos sofisticados y extremadamente caros para este tipo de sistemas fotovoltaicos.

Las técnicas propuestas permiten estimar los valores del factor de trabajo (d_f , duty factor) y los diferentes niveles ('alto' y 'bajo') de las formas de onda PWM de la tensión y la corriente ($v_{A,H}$, high state of photovoltaic array voltage, $v_{A,L}$, low state of photovoltaic array voltage, $i_{A,H}$, high state of photovoltaic array current y $i_{A,L}$, low state of photovoltaic array current) con una adecuada precisión y exactitud. Estas técnicas se basan en las medidas del valor medio y el verdadero valor eficaz de ambas formas de onda, y tienen en cuenta la naturaleza de funcionamiento de los reguladores serie o paralelo cuando están en la fase PWM. Los reguladores tipo serie cuando están en la fase PWM conectan (estado #1) y desconectan (estado #2) el generador fotovoltaico de la batería, mientras que los reguladores del tipo paralelo están conectados al generador fotovoltaico con las baterías (estado #1) o cortocircuitando el generador fotovoltaico (estado #2). En este sentido, la corriente que circula en el generador fotovoltaico es nula para el caso de los reguladores serie en el estado #2, mientras que la tensión es cero en el generador fotovoltaico en el estado #2 para el caso de los reguladores paralelo. Por tanto, conociendo un nivel de la forma de onda de la corriente para el tipo serie o nivel de tensión para el tipo paralelo y realizando medidas del valor medio y el verdadero valor eficaz de las señales de tensión y corriente se estiman el resto de parámetros de ambas formas de onda para ambos reguladores. Una vez que se disponen dichos parámetros se pueden reconstruir las formas de onda de tensión y corriente del generador fotovoltaico.

Los resultados obtenidos se han validado con una campaña de datos en un sistema fotovoltaico autónomo con un regulador serie y otro sistema fotovoltaico con regulador paralelo con sus respectivos sistemas de adquisición de datos. Se han empleado sistemas

de adquisición de altas prestaciones que satisfacen los requisitos y las recomendaciones indicadas en el estándar IEC 61724-1 para poder obtener una reconstrucción de la señal con una incertidumbre menor al 1% [56]. También, para el control de la monitorización y la gestión del almacenamiento se ha utilizado la herramienta LabVIEW®.

De entre todos los datos medidos durante la campaña de datos, solo se han seleccionado aquellos en los que el regulador está en la fase PWM. Con esto se persigue que el estudio se centre solamente en las señales tipo PWM y con ello los resultados no se vean influenciados por el resto de señales que se generan en el sistema en las diferentes etapas de carga de la batería. Se debe destacar que los datos que no se han tenido en cuenta, y que se no se corresponden con la fase de regulación (PWM), pertenecen a señales de corriente continua (DC, direct current) que no presentan rápidas variaciones con el tiempo, es decir se pueden considerar constantes. Estas señales, a diferencia de las señales PWM, son de fácil monitorización.

Una vez seleccionados los datos a analizar, se han procesado con la herramienta Matlab® para obtener el factor de trabajo y los diferentes niveles de ambas formas de onda según el procedimiento indicado en el estándar *181TM IEEE Standard for Transitions, Pulses, and Related Waveforms* [57]. Los valores obtenidos con este procedimiento son los considerados como valores de referencia. De manera análoga, con los datos seleccionados se han aplicado las técnicas propuestas y se han estimado el factor de trabajo y los niveles de las formas de onda de tensión y corriente para ambos reguladores. Los valores de los parámetros con este procedimiento son considerados como estimados. Los parámetros estimados han sido comparados con los parámetros de referencia con los siguientes criterios estadísticos: error porcentual (PE, percentage error), error cuadrático medio normalizado (NRMSE, normalized root mean square error), error medio sistemático normalizado (NMBE, normalized mean bias error) y error porcentual absoluto medio (MAPE, mean absolute percentage error).

Los resultados de los datos analizados de la comparación de los parámetros muestran que el regulador serie para el d_f tiene un NRMSE menor al 0.89%, un MBE del 0.44% y un MAPE del 1.3%; resultados similares se han obtenido para el parámetro $i_{A,H}$, el NRMSE tiene un valor inferior al 1.66%, un MBE del -0.44% y un MAPE del 1.3%; semejantes resultados se consiguen para el parámetro $v_{A,H}$, donde NRMSE es menor al 1.35%, un MBE del 1.08% y un MAPE del 1.09% y de manera análoga para $v_{A,L}$ se alcanzan un NRMSE del 0.83%, un MBE del 0.57% y un MAPE del 0.66%.

Por otro lado, los resultados obtenidos para los parámetros de las formas de onda del regulador PWM del tipo paralelo son prácticamente semejantes a los valores del regulador PWM del tipo serie. En este sentido, para el parámetro d_f se ha obtenido un NRMSE menor al 0.3%, un MBE del 0.13% y un MAPE del 0.66%; para el parámetro $v_{A,H}$ se ha obtenido un NRMSE del 0.91%, un MBE del -0.51% y un MAPE del 0.51%; para el parámetro $i_{A,H}$ se consiguen valores del NRMSE al 0.88%, un MBE del 0.49% y un MAPE del 0.87% y de manera análoga para $v_{A,L}$ se alcanzan un NRMSE del 2.4%, siendo este el mayor obtenido, un MBE del -1.45% y un MAPE del 1.43%.

Tanto el factor de trabajo, como los niveles alto y bajo de las formas de onda de la corriente y tensión muestran que los errores analizados dependen del valor del factor de trabajo, cuanto menor es el factor de trabajo el resultado de los errores estudiados aumenta menos para los parámetros $i_{A,L}$ para el regulador PWM del tipo paralelo y la $v_{A,H}$ del regulador PWM tipo serie que en estos casos es cuanto mayor es el factor de trabajo mayor es el valor de los errores estudiados. No obstante, para estudiar este efecto se ha

divido en diez intervalos el rango del factor de trabajo, los resultados muestran que para la gran mayoría de los parámetros tienen unos valores inferiores al 5% y solo son superiores al 5% cuando el factor de trabajo tiene un valor en el rango 0-0.1 para los parámetros d_f y $i_{A,H}$ en el regulador serie y para el regulador paralelo el parámetro $i_{A,H}$ pero en el rango 0.9-1.

De manera global, los resultados alcanzados en la comparación de los parámetros de ambas formas de onda (corriente y tensión) para ambos sistemas fotovoltaicos (regulador serie y paralelo) muestran que los errores NRMSE, NMBE y MAPE para la muestra de datos analizados son inferiores en todos los casos al 2.4%. Se puede concluir que las técnicas propuestas para la obtención de los parámetros muestran unos resultados de los diferentes errores estudiados bajos y por tanto, es posible calcular los parámetros de las formas de onda evitando el uso de DAS costosos y complejos que requieran gestionar una gran cantidad de datos causada por la necesidad de realizar una frecuencia de muestreo alta.

De acuerdo con esto, las técnicas propuestas podrían ser utilizadas no solo en los sistemas fotovoltaicos autónomos con reguladores PWM, sino en aquellos sistemas que usen señales PWM y a priori se conociera uno de los niveles de una de las dos señales, corriente y tensión, o el factor de trabajo, como por ejemplo es el caso del control de la luminosidad en un gran número de aplicaciones con tecnología que emplean diodos emisores de luz (LED, light-emitting diode) [72].

4.2 Objetivo específico 2

El segundo objetivo específico, definido como ‘Desarrollar técnicas de monitorización de la potencia del generador fotovoltaico y de la estimación de la energía entregada por este último en los diferentes tipos de sistemas fotovoltaicos autónomos con reguladores PWM’ ha sido abordado en la siguiente publicación:

- G. Jiménez-Castillo, F. Muñoz-Rodríguez, C. Rus-Casas, P.G. Vidal, Improvements in**
 [2] array power monitoring in Pulse-Width Modulation charge controllers, , *Sensors*. 19 (2019) 2150. doi:10.3390/s19092150.

En la publicación anterior se exponen las técnicas de monitorización y de estimación de la potencia en corriente continua del generador fotovoltaico ($P_{A,dc}$ photovoltaic array direct current output power) y la energía de salida del generador fotovoltaico (E_A). Ambos parámetros son de gran utilidad para realizar un estudio de funcionamiento del generador fotovoltaico y por ende del sistema fotovoltaico tal y como se especifica en el estándar IEC 6172-1 [56].

De manera similar al anterior objetivo, se han obtenido ambos parámetros con sistemas de adquisición de datos con altas prestaciones que garanticen una incertidumbre baja y proporcionen una alta precisión y exactitud en las medidas. Estos datos serán los utilizados como valores de referencia. Para la estimación de la potencia y energía de salida del generador fotovoltaico en corriente continua se emplean los parámetros estimados con las técnicas propuestas en el anterior objetivo específico. También las potencias y energías de referencia han sido comparadas con las potencias y energías estimadas con los mismos criterios estadísticos. Los resultados muestran, para el regulador serie, que $P_{A,dc}$ y E_A tienen un NRMSE del 2% y 1.5% respectivamente, ambas un NMBE del -1.3% y un MAPE del 1.5% y 1.2% respectivamente para el caso del sistema fotovoltaico con regulador paralelo. Por otro lado, los resultados obtenidos para $P_{A,dc}$ y E_A el regulador

serie son NRMSE al 1.1% y 0.8%, NMBE del -0.8% y -0.7% y un MAPE del 1.5% y 1.2% respectivamente.

El PE de $P_{A,dc}$ muestra que depende del duty factor, d_f , aunque hay muy pequeñas diferencias entre los valores estimados y los valores de referencia en todo el rango de medida. Los mayores valores de PE observados corresponden con un d_f cercano a cero, para ambos reguladores; cuando d_f es mayor del 0.25 el PE es menor del 5%. Para d_f comprendidos entre 0.01 y 0.25 el PE es menor al 10% para la gran mayoría de los datos analizados. No obstante, se debe remarcar que pequeños valores de d_f se obtienen cuando el estado de la batería es alto, por lo tanto, la energía del generador que va a la batería en esta situación es prácticamente despreciable y por tanto la estimación de E_A apenas se verá afectada tal y como muestran los resultados obtenidos.

Tanto los resultados que se han obtenido en el objetivo primero como los del objetivo segundo validan las técnicas de monitorización propuestas para los sistemas fotovoltaicos con reguladores PWM del tipo serie y paralelo. Estas técnicas pueden ser implementadas con el empleo de Tarjetas de adquisición de datos (DAQ, data acquisition device) junto con traductores y/o sensores del valor medio y eficaz de la señal de corriente y tensión. Los DAQ es posible sustituirlos por plataformas de hardware-software abiertas y en vez de utilizar traductores se puede emplear circuitos electrónicos ad hoc para la obtención de los valores medios y verdadero eficaz de las señales. Las técnicas propuestas proporcionan el factor de trabajo con la medida de esos parámetros, no obstante, es posible medir el factor de trabajo en sustitución del valor medio o el valor eficaz, y las técnicas propuestas podrían ser empleadas. El factor de trabajo se puede obtener bien a través de entradas específicas de algún tipo de DAQ bien con el empleo de microcontroladores con pines específicos para esta medida y una rutina software adecuada.

4.3 Objetivo específico 3

El tercer objetivo específico, '*Analizar la influencia del intervalo de registro y del periodo de análisis en la estimación de la energía fotovoltaica autoconsumida en los sistemas fotovoltaicos de autoconsumo.*' se desarrolla en la siguiente publicación:

- G. Jiménez-Castillo, F.J. Muñoz-Rodríguez, C. Rus-Casas, G.M. Tina, Smart meters**
[3] for the evaluation of self-consumption in zero energy buildings, in: 2019 9th Int. Renew. Energy Congr., 2019: pp.(pendiente de publicación). doi: (pendiente de publicación). (Aceptado)

En esta publicación se aborda la influencia en la estimación de la energía solar fotovoltaica autoconsumida en función del tiempo de almacenamiento de los parámetros de medida (e.g. potencia consumida, potencia generada por el generador fotovoltaico y potencia autoconsumida) y del periodo de análisis en los sistemas fotovoltaicos de autoconsumo. En este sentido, para estimar la energía fotovoltaica autoconsumida se han analizado las diferencias que se producen en el acoplamiento entre el perfil de generación fotovoltaico y el perfil de la demanda eléctrica de las cargas empleando cinco intervalos de registro de datos (1 minuto, 10 minutos, 15 minutos, 30 minutos y 60 minutos) y dos periodos de análisis (diarios y anuales). Los intervalos de registro seleccionados son aquellos en los que suelen estar disponibles los datos de radiación y perfiles de consumo. En Europa, los medidores inteligentes empleados para medir el consumo eléctrico suelen registrarlo en los intervalos de 10 minutos, 15 minutos o 1 hora [73]. El intervalo de registro se define como el tiempo que ha transcurrido entre dos registros, los parámetros

registrados en cada registro suelen ser el promedio, el valor máximo el mínimo u algún tipo de función apropiada al parámetro en cuestión, mientras que el intervalo de muestreo es el tiempo definido entre dos muestras de un parámetro [56].

El perfil de generación fotovoltaico ha sido estimado a través de los datos de radiación considerando un rango de potencia pico del sistema fotovoltaico desde 0.01 a 10 kWp, mientras que el perfil de carga se corresponden con datos experimentales de una vivienda durante un año con el empleo de un contador inteligente con una adecuada precisión, inferior al 2%, instalado a tal efecto. Tanto la radiación como la potencia consumida de la vivienda han sido monitorizadas con un intervalo de muestreo de un segundo. Sin embargo, el intervalo de registro es de un minuto; se han registrado por cada parámetro el valor máximo, mínimo y medio durante ese intervalo de registro. Los datos con este intervalo de registro han sido los tomados como referencia en este estudio, el resto de los valores promediados considerando diferentes intervalos de registro han sido estimados con los datos de referencia. Con los parámetros de potencia del generador fotovoltaico y la potencia demandada por la vivienda, se estima la energía solar fotovoltaica autoconsumida considerando los diferentes intervalos de registro en los dos periodos de análisis. La influencia de estos parámetros (intervalo de registro y periodo de análisis) en la estimación de la energía fotovoltaica autoconsumida se analiza con el PE.

Para un periodo de análisis diario, los PE diarios calculados muestran una gran dispersión para los diferentes intervalos de registro, por ejemplo, se han encontrado hasta PE de 52% para un intervalo de registro de 60 minutos con una potencia pico del generador fotovoltaico de 2.8 kWp. Por otro lado, para un periodo de análisis anual los PE encontrados tienen menor dispersión y en este periodo de análisis el mayor valor del PE del 13% para un intervalo de registro de 60 minutos con una potencia del generador fotovoltaico de 1.8 kWp.

En el perfil de carga analizado, los mayores PE encontrados para todos los intervalos de registro y un intervalo de análisis diario corresponden en el rango de potencias de 1.5-2.8 kWp y valores del PE de 16.9%, 19.0%, 24.8% y 52.1% para intervalo de registro respectivamente de 10, 15, 30 y 60 minutos. Por otro parte, para un periodo de análisis anual los PE son menores y tienen un valor de 4.8%, 6.4%, 9.3% y 13% para intervalos de registro de 10, 15, 30 y 60 minutos de manera respectiva. En ambos periodos de análisis, conforme se reduce el intervalo de registro el PE se ve reducido para la mayoría de los casos. Sin embargo, empleando el mismo intervalo de registro, el efecto del promediado de los datos se ve suavizado cuando se utilizan periodos de análisis anuales.

Cualquier intervalo de registro ocasiona una pérdida de información cuando los parámetros almacenados son promediados. El promediado de la radiación solar y de la demanda de una vivienda para la estimación de la energía fotovoltaica autoconsumida produce una sobreestimación que afectará a índices energéticos como los de autoconsumo y autosuficiencia, así como a parámetros económicos que se calculen con esta energía. La sobreestimación aumenta cuando el intervalo de registro es mayor y su efecto se ve suavizado en periodos anuales comparado con periodos diarios. Por tanto, emplear un intervalo de registro adecuado, tal y como se ha analizado, es importante en este tipo de sistemas para la estimación adecuada de la energía fotovoltaica consumida, y este parámetro no solo es empleado para análisis energéticos o análisis funcionales de este tipo de sistemas, sino también para determina determinados parámetros económicos como es el caso del precio de la energía eléctrica.

4.4 Objetivo específico 4

El cuarto objetivo específico, *‘Definir y analizar métodos de dimensionado de sistemas fotovoltaicos de autoconsumo en viviendas residenciales a partir de datos monitorizados de consumo. Se pretende conseguir que el coste de la electricidad generada por el sistema sea competitivo comparado con el precio de la electricidad de la red eléctrica, maximizando la energía fotovoltaica autoconsumida’* se ha abordado en la siguiente publicación:

- 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. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.088>.

En esta publicación se expone un método novedoso de dimensionado del generador fotovoltaico para sistemas de autoconsumo directo en el ámbito residencial a partir de los datos monitorizados de consumo donde la estrategia seguida es garantizar que la energía eléctrica generada por el sistema fotovoltaico sea competitiva en precio con respecto al precio de la electricidad obtenida de la red eléctrica. Este criterio no sólo busca obtener un coste de la electricidad competitivo, sino que permite maximizar la energía fotovoltaica autoconsumida que, a su vez, redonda en beneficios ambientales y también permite a los usuarios no depender exclusivamente del abastecimiento energético a través de la red eléctrica.

El método propuesto tiene como entrada tanto los parámetros económicos como los parámetros monitorizados del perfil de consumo de la vivienda y radiación solar. Los datos monitorizados, como se ha mostrado en el objetivo anterior, pueden influenciar en la estimación de la energía fotovoltaica dependiendo del intervalo de registro y periodo de análisis, por tanto, para minimizar este efecto se ha utilizado datos de un intervalo de registro de al minuto y se ha realizado un periodo de análisis anual. Por lo tanto, el primer paso a realizar después de disponer los datos monitorizados es un análisis energético con el fin las curvas de los índices de autoconsumo (ϕ_{sc}) y autosuficiencia (ϕ_{ss}) frente a la potencia del generador del sistema fotovoltaico de autoconsumo; después, se procede a la estimación del coste de la electricidad autoconsumida del generador fotovoltaico durante la vida útil del sistema (C_s) en función del índice de autoconsumo.

En el primer paso, con los datos de radiación se estima la potencia fotovoltaica generada en función de la potencia pico del generador fotovoltaico, con esta potencia y la potencia del consumo monitorizado se estima la potencia fotovoltaica autoconsumida en función de la potencia pico del generador fotovoltaico. Una vez obtenidas las diferentes potencias, se estiman las respectivas energías en el periodo de análisis anual. A continuación, los índices de autoconsumo y autosuficiencia son calculados con la energía fotovoltaica generada, energía fotovoltaica autoconsumida y la energía eléctrica consumida.

En el segundo paso, se describe el modelo utilizado para estimar el coste de la generación de electricidad fotovoltaica autoconsumida directa en función del índice de auto-consumo. Para la estimación de C_s se ven involucrados tanto parámetros económicos y técnicos: rendimiento final anual (Y_F , annual final yield), vida útil del sistema fotovoltaico (N , lifetime of the PV system), costo inicial de la inversión del sistema fotovoltaico (PV_I , initial investment cost of PV system), tasa de impuesto a la renta (T , income tax rate), tasa de descuento nominal (d , nominal discount rate), interés

del préstamo (i , loan interest rate), préstamo (N , repaying loan), dividendos (d_{eq} , dividends), tasa de degradación anual (r_d , anual degradation rate), tasa de inflación (g , inflation rate), costos anuales de operación y mantenimiento (PV_{AOM} , annual operation and maintenance costs), tasa de aumento anual de los costes de operación y mantenimiento ($r_{O\&M}$, annual escalation rate of the operation and maintenance costs) y el precio de la electricidad en el sector residencial.

A continuación, el coste obtenido se compara con el precio de la electricidad de los consumidores para el sector residencial para obtener el rango de valores competitivos. Cuando C_s disminuye, aumenta el índice de ϕ_{sc} , y para aumentar el ϕ_{sc} se disminuye la potencia pico del generador fotovoltaico. Dentro del rango de valores de C_s que son inferiores al precio de la electricidad, aquél que valor que los iguala se obtiene el menor índice de autoconsumo y por ende el mayor índice de autosuficiencia, lo que implica que en ese punto se maximiza la cantidad energía fotovoltaica autoconsumida.

En el manuscrito ilustra el método con tres diseños. Para ello, se han monitorizado tres viviendas residenciales y la radiación solar durante un año. Los resultados del método muestran que la residencia #1 un valor de ϕ_{sc} igual a 50% hace que C_s y el precio de la electricidad se igualan, mientras que para la casa #2 y la casa #3 se igualan para un valor de ϕ_{sc} del 65%. En cambio la potencia del sistema fotovoltaico para la casa #1 es de un valor de 1.2 kWp, para la casa #2 1.9 kWp y la casa 3# 2.6 kWp.

En este trabajo de investigación se muestra que en ausencia de subvenciones y sin obtener un rédito económico por aquella energía fotovoltaica generada que no se consume por la vivienda, el coste de la electricidad que se autoconsume del generador fotovoltaico puede ser inferior al precio de la electricidad del sector residencial, al menos en el caso de España.

4.5 Objetivo específico 5

El quinto objetivo específico, ‘*Definir y analizar métodos de dimensionado a partir de los datos monitorizados de sistemas fotovoltaicos de autoconsumo siguiendo un enfoque de rentabilidad económica*’ se ha abordado en la siguiente publicación:

- G. Jiménez-Castillo**, F. J. Muñoz-Rodríguez*, C. Rus-Casas, D.L. Talavera, A [5] new approach based on economic profitability to sizing the photovoltaic generator in self-consumption systems without storage, (Bajo Revisión)

En este artículo se propone y se analiza un nuevo método de dimensionado del generador fotovoltaico para sistemas de autoconsumo fotovoltaico directo en el sector residencial que maximiza el valor neto actual (NPV, net present value). Mientras que el método propuesto del objetivo específico 4 persigue ser competitivo en costes según el precio de la electricidad, este nuevo método persigue optimizar la rentabilidad económica. De manera análoga al método de dimensionado del generador fotovoltaico indicado en el Objetivo específico 4, en este método el primer paso a realizar es un análisis energético para obtener la estimación de la energía fotovoltaica autoconsumida y los índices de autosuficiencia y autoconsumo a través de los datos monitorizados de la potencia consumida y la radiación solar. El siguiente paso consiste en la estimación del NPV en función de la potencia pico del generador fotovoltaico. La novedad del método de dimensionado radica en que proporciona las curvas de los índices de autosuficiencia y autoconsumo junto con la curva del NPV en función de la potencia pico del generador fotovoltaico. En ese sentido, se puede constituir en una herramienta muy interesante y

eficaz, que junto con las curvas de los índices de autoconsumo y autosuficiencia, permite obtener el tamaño del generador fotovoltaico que maximiza el NPV.

Así mismo, en este manuscrito se analizan dos posibles escenarios dependiendo si el excedente de energía solar fotovoltaica generada se puede verter a la red eléctrica sin remuneración económica (escenario A) o con remuneración económica (escenario B). El método de dimensionado es ilustrado con tres perfiles de viviendas del sector residencial y un perfil de generación fotovoltaica en función de la potencia pico del generador. Los datos de la potencia consumida se han obtenido de la monitorización de las tres viviendas con un tiempo de registro de un minuto durante un año para evitar la sobreestimación que se produce al utilizar otros intervalos de registro mayores. Por otro lado, los datos de irradiancia han sido obtenidos con una estación meteorológica que tiene un tiempo de muestreo de un segundo y un tiempo de registro de un minuto. Para ambos escenarios se ha tenido en cuenta las tarifas eléctricas más genéricas del sector residencial para analizar la posible influencia. En este sentido, se ha analizado la influencia de tres posibles tarifas del sector residencial que tienen un precio de la electricidad u otro en función de la franja horaria: sin discriminación horaria y un único precio (tarifa One), con discriminación horaria de dos franjas y de dos precios (tarifa OneNight), y con tres franjas horarias y tres precios (tarifa Tempo).

Los resultados de los tres perfiles de carga analizados muestran que el NPV se maximiza para tamaños del generador fotovoltaico mayores en el escenario B en comparación con los del escenario A. Los tamaños del generador fotovoltaico en el escenario A son en torno al 50%-70% de los tamaños obtenidos con el escenario B. De igual manera, el NPV en el escenario B es mayor entre el 30-40% si es comparado con los datos obtenidos en el escenario A. La horquilla de la potencia del generador fotovoltaico que hace el NPV mayor a cero, es decir rentable la inversión, es cercano al doble en escenario B comparados con los del escenario A.

En el escenario A, el tamaño que máxima el NPV en las tres viviendas analizadas proporciona índices de autoconsumo en el rango 80-84% e índices de autosuficiencia en el intervalo 8-23% cuando la tarifa no tiene discriminación horaria, mientras para las tarifas con discriminación horaria los índices de autoconsumo y autosuficiencia son similares y tienen unos rangos de 76-81% y 9-25% respectivamente. En cambio, en el escenario B para la tarifa One el índice de autoconsumo para las tres viviendas tiene un rango de 65-67% y el índice de autosuficiencia del 11-31%. De manera similar al escenario A, cuando la tarifa tiene discriminación horaria los índices de autoconsumo disminuyen sutilmente 60-65% y los índices de autosuficiencia aumentan ligeramente 11-34%.

Por otra parte, la elección de las tarifas se ve reflejado en ambos escenarios de manera parecida. El tamaño del generador fotovoltaico puede variar entre un 5% al 30% entre la elección de una tarifa u otra, siendo el tamaño menor cuando se escoge una tarifa con una franja única y los tamaños mayores cuando se seleccionan con discriminación de tres franjas horarias. De manera análoga, el NPV mayor se obtiene cuando hay tres discriminaciones horarias, entorno al 20-36% superior si se compara con una sola franja horaria. En cambio, entre dos y tres franjas de discriminación horaria los resultados obtenidos muestran que el tamaño del generador fotovoltaico no se ve tan influenciado, con valores entre 0-10% y el NPV con valores entre el 2-15%.

En general para las viviendas estudiadas para ilustrar el método de dimensionado del generador fotovoltaico de un sistema de autoconsumo, se logra un mayor NPV cuando se

emplean tarifas eléctricas que utilizan discriminación horaria. Además, el intervalo de la potencia del generador fotovoltaico donde el NPV es mayor a cero se ve ampliado si se compara cuando no hay discriminación horaria, en este sentido la elección de la tarifa eléctrica es un parámetro clave para optimizar el NPV. Con respecto a los dos escenarios analizados, cuando se producen una remuneración económica por la energía fotovoltaica inyecta a red el NPV es mayor y también es más grande el intervalo de la potencia del generador fotovoltaico que el valor de NPV es mayor a cero. Esto implica que los índices de autosuficiencia puedan aumentarse y llegar alcanzar valores superiores al 40% para valores del NPV que hacen rentables la inversión.

El método de dimensionado con los ejemplos ilustrados muestra que la inversión en estos sistemas puede ser atractiva y por tanto se puede promover la producción eléctrica fotovoltaica descentralizada en las zonas urbanas.

5. Conclusiones

Esta tesis está compuesta por un conjunto de trabajos de investigación que pretenden aportar contribuciones relevantes en el ámbito de la monitorización y análisis de funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos, especialmente en los sistemas fotovoltaicos autónomos y los sistemas fotovoltaicos de autoconsumo en el sector residencial. Las técnicas y métodos de monitorización, así como el análisis de funcionamiento propuestos deben ser sencillos y fáciles de implementar. No obstante, no se debe comprometer la exactitud y precisión de los resultados que ofrecen y deben satisfacer las exigencias de la normativa vigente. Así mismo, el coste de los sistemas de monitorización debe ser acorde con el coste de la instalación fotovoltaica que se pretende monitorizar. Una adecuada monitorización se puede traducir en una estimación exacta y precisa de determinados parámetros que no solo permiten realizar un buen análisis desde el punto de vista energético sino también desde el punto de vista económico. En sistemas fotovoltaicos de autoconsumo puede ser especialmente relevante puesto que se debe estimar la energía fotovoltaica autoconsumida que se ahorra de la red eléctrica, así como la energía fotovoltaica no autoconsumida que se puede verter a la red.

Las principales conclusiones obtenidas en la presente Tesis se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Se han desarrollado nuevas técnicas de monitorización para obtener los niveles altos, bajos y el factor de trabajo de las formas de onda de corriente y tensión, así como la potencia del generador fotovoltaico y la estimación de la energía entregada de este último tanto para sistemas fotovoltaicos con reguladores PWM tipo serie como paralelo. Las técnicas satisfacen las recomendaciones y la normativa vigente. Así mismo, también persiguen que no se vean comprometidas la exactitud y precisión de las medidas. En este sentido, se han conseguido errores (error cuadrático medio normalizado, error medio sistemático normalizado y error porcentual absoluto medio) para los parámetros de las formas de onda de la corriente y tensión inferiores al 2.4%. De manera similar, los resultados tanto de la potencia como la estimación de la energía han alcanzado un error cuadrático medio normalizado inferior al 2%, un error medio sistemático normalizado en el rango -0.8 y -1,5% y un error porcentual absoluto medio con un valor menor al 1,52%. Asimismo, los resultados muestran que el PE obtenido de la potencia de salida del generador fotovoltaico depende del factor de trabajo, d_f : a menor d_f mayores PE. No obstante, estos valores son siempre inferiores al 5% cuando d_f es mayor a 0.2. Por otro lado, cuando d_f es inferior a 0.2 la gran mayoría de las medidas obtenidas presentan errores inferiores al 10%. Se debe remarcar que, en estos casos, la energía que va desde el generador a la batería puede ser prácticamente despreciable ya que la batería está en altos niveles de carga, por lo que el efecto del error en este último caso es prácticamente marginal. De acuerdo con los resultados obtenidos, las técnicas propuestas pueden ser usadas con una adecuada precisión y exactitud para calcular parámetros fundamentales de las formas de onda de tensión y corriente, así como para la potencia y para la estimación de la energía del generador fotovoltaico en sistemas fotovoltaicos autónomos con reguladores PWM tanto del tipo serie como del tipo paralelo. Por último, destacar que las técnicas propuestas de monitorización de las formas de onda corriente y tensión pueden ser fácilmente extrapoladas para utilizarlas en otras aplicaciones que utilicen señales PWM.

- Se ha analizado la influencia del intervalo de registro y periodo de análisis en la estimación de la energía solar fotovoltaica autoconsumida en sistemas de autoconsumo en el sector residencial para un rango de potencias del generador fotovoltaico de 0.01 a 10 kWp. En este análisis se ha observado una sobrestimación de la energía solar fotovoltaica autoconsumida que aumenta al considerar intervalos de registro más grandes. Del mismo modo, se ha observado un mayor PE así como una gran dispersión de los valores del mismo considerando un periodo de análisis diario para los diferentes intervalos de registro analizados. Por otra parte, el efecto del promediado disminuye los valores del PE a la hora de estimar la energía fotovoltaica autoconsumida cuando se consideran periodos de análisis anuales en vez de diarios si se emplea el mismo intervalo de registro. Para el caso de España, los datos del perfil de consumo de los usuarios suelen estar disponibles con intervalos de registro de una hora, por lo que el error porcentual puede ser elevado tanto para un periodo de análisis diario como anual. Se recomienda que para análisis diarios se empleen intervalos de registro de al menos un minuto, mientras que, para análisis anuales, se pueden emplear intervalos de registro de 15 minutos.
- Se han desarrollado dos métodos de dimensionado del generador fotovoltaico para sistemas de autoconsumo directo en el sector residencial: el primero busca que el coste de la energía eléctrica generada sea competitiva con el precio de la electricidad de la red eléctrica a la vez que se maximiza la energía fotovoltaica autoconsumida, mientras que el segundo método busca maximizar la rentabilidad económica de la instalación de autoconsumo. Los dos métodos han sido ilustrados con el dimensionado de tres generadores fotovoltaicos para tres perfiles de consumo que fueron monitorizados durante un año. En virtud del método utilizado se obtienen unos tamaños y unos valores de los índices de autoconsumo y autosuficiencia. Por un lado, los tamaños del generador fotovoltaicos que consiguen que el coste de la energía eléctrica generada sea competitiva con el precio de la electricidad de la red eléctrica tienen un rango de índices de autoconsumo del 50-60% e índices de autosuficiencia en el rango 37-45%, teniendo en cuenta que se consiguen sin ningún tipo de subvención y sin que la energía fotovoltaica sobrante tenga una remuneración económica. De acuerdo con los resultados obtenidos, el método desarrollado muestra que el coste de la electricidad generada por un sistema de autoconsumo residencial puede ser menor al precio que tiene la electricidad de la red eléctrica en el sector residencial, pudiéndose alcanzar índices de autosuficiencia cercanas al 50%. Por otro lado, en el segundo método, se han considerado dos escenarios dependiendo si el excedente de la electricidad generada es sin remuneración, escenario A, y un segundo escenario con remuneración económica, escenario B. También, para cada escenario se han considerado tres posibles tarifas del precio de la electricidad dependiente de la discriminación horaria: un único precio en toda la franja horaria (One), dos precios en dos franjas diferentes (One night) y tres precios en tres franjas (Tempo). Los resultados muestran en el escenario B la horquilla de potencias que hacen rentable la inversión es más amplia si se compara con el escenario A. En el escenario B, tanto el tamaño del generador como el valor de NPV son mayores. Los índices de autoconsumo y autosuficiencia obtenidos con el método de dimensionado que optimiza el NPV tienen un rango del 80-84% y 8-23%, respectivamente, para los tres perfiles de consumo analizados en el escenario A si se utiliza una tarifa sin discriminación horaria. Mientras que los valores de los índices de autoconsumo y autosuficiencia en el mismo escenario, pero con discriminación son del 76-81% y 9-25%, respectivamente. Por otro lado, en el escenario B el índice de autoconsumo tiene un rango de 65-67% y el índice de autosuficiencia del 11-31% para la tarifa sin discriminación horaria. De manera

similar al escenario A, cuando la tarifa tiene discriminación horaria los índices de autoconsumo disminuyen sutilmente 60-65% y los índices de autosuficiencia aumentan ligeramente 11-34%. Según el método propuesto, y para las viviendas analizadas, el NPV se maximiza con altos índices de autoconsumo y bajos índices de autosuficiencia, aunque es posible obtener índices de autosuficiencia cercanas al 50% en el escenario B y alcanzar cierta rentabilidad. También, la elección de la tarifa se convierte en un parámetro clave para optimizar el tamaño del generador para conseguir maximizar el NPV. Aunque ambos métodos hayan sido ilustrados para el caso español, estos métodos pueden ser fácilmente utilizados en otros países tan solo incluyendo los parámetros tecno-económicos adecuados.

En relación a las líneas de trabajo futuras, es importante destacar que los sistemas fotovoltaicos autónomos son sistemas de relativo bajo coste, por tanto, se debe buscar soluciones para su monitorización que consigan un compromiso técnico entre la sencillez y la calidad de los datos obtenidos, así como el económico. Debido a su bajo relativo bajo costo, estos sistemas no se suelen monitorizar y el mantenimiento preventivo suele ser escaso. En este sentido, se requiere abordar el diseño de prototipos con el empleo de plataformas hardware/software abiertas que utilicen las técnicas de monitorización mostradas, así como la definición de los criterios que permitan determinar aquellos no correctos funcionamientos de los sistemas fotovoltaicos autónomos para las diferentes condiciones de trabajo.

Por otra parte, los sistemas fotovoltaicos de autoconsumo en edificios son relativamente recientes y se espera que su implantación crezca en los próximos años, por tanto, surge la necesidad de disponer de métodos de dimensionado del generador fotovoltaico así como del resto de elementos que conforman el sistema que puedan satisfacer los diferentes objetivos planteados. Los métodos desarrollados pueden ser utilizados por futuros propietarios o inversores interesados en los sistemas fotovoltaicos. Así mismo, la energía fotovoltaica autoconsumida es un parámetro útil tanto desde el criterio técnico como desde el criterio económico. Por consecuente, su estimación en función de la resolución temporal requiere un análisis adicional aplicando el enfoque propuesto en un mayor número de perfiles de consumo de diferentes localidades. También la influencia de la resolución temporal debería ser analizada en otros parámetros técnicos y económicos. Por último, la gestión íntegra de la monitorización en sistemas fotovoltaicos de autoconsumo puede ser un reto, debido al gran número de instalaciones que se prevén y al ser instalaciones relativamente pequeñas. Esto implica que los usuarios deben realizar las tareas de mantenimiento o contratarlas externamente a empresas, donde la monitorización no será solo la encargada de registrar los datos, sino de proporcionar análisis y posible detección de anomalías para facilitar el mantenimiento preventivo.

6. Conclusions and future research lines.

This PhD thesis consists of a set of research works, whose aim is to provide relevant contributions in the monitoring field and performance analysis of photovoltaic systems, especially in stand-alone photovoltaic systems and self-consumption photovoltaic systems in the residential sector. The monitoring techniques and methods, as well as the proposed performance analysis, should be simple and easy to implement. However, the methods should provide high accuracy and the requirements of standards must be followed. Moreover, the cost of the monitoring systems should be in accordance with the cost of the photovoltaic installation which have been monitored. An adequate monitoring provides an accurate estimation of measured parameters that not only address a performance analysis based on monitoring data from the energy point of view but also from the economic point of view. In self-consumption photovoltaic systems, self-consumed energy may be relevant because it is the electrical energy which can be saved from the electricity grid as well as the generated energy which is not self-consumed energy fed into the grid.

The main conclusions can be summarized in the following points:

- New and simple monitoring techniques for stand-alone system series and shunt PWM battery charge controllers have been developed. The techniques can be obtained from the main electrical parameters of current and voltage PWM waveforms of a photovoltaic array and they can be used to calculate the output power and estimate the output energy of photovoltaic array without using sophisticated data acquisition systems. The techniques meet the recommendations and the requirements of the standards. As a result, the duty factor, low state of photovoltaic array current, low state of photovoltaic array current, high state of photovoltaic array voltage and low state of photovoltaic array voltage show a high accuracy with errors (normalized root mean square error, normalized mean bias error, mean absolute percentage error) lower than 2.4 %. The output power and estimated output energy of photovoltaic arrays in both charge controllers have the NRMEs lower than 2%, with the NMBEs range between -1.5 and -0.8 % and the MAPEs are below 1.52%. The results also show that the percentage error of the $P_{A,dc}$ depends on the duty factor, d_f , the lower d_f , the higher the PE. However, when the d_f is higher than 0.2 the PEs are below 5%. On the other hand, when the d_f is lower than 0.2, the PEs are generally lower than 10%. It should stressed that very low duty factors were reached when there was a high battery SOC. Therefore, the estimated array power to the battery may be negligible. Thus, the estimated energy from the PV array will be almost unaffected. Regarding the results achieved, the new technique can be used to estimate the key electrical parameters of voltage and current PWM waveforms of a photovoltaic array, photovoltaic array DC output power and photovoltaic DC output energy in stand-alone systems with series PWM battery charge controllers with high accuracy and using unsophisticated data acquisition systems. Moreover, the proposed techniques may easily be used in other applications where PWM signals are employed.
- The influence of averaging the estimation of self-consumed photovoltaic solar energy, the $E_{PV,consumed}$, in self-consumption systems has been analyzed. Various reporting periods and recording intervals in a photovoltaic generator, which ranks from 0.01 to 10kWp, have been considered. The results show an overestimation of the $E_{PV,consumed}$, the self-consumption index and the self- sufficiency index when the recording intervals is lager. Similarly, it has observed the highest PE as well as a great dispersion

of the PE values have been observed when a daily reporting period is selected for the different recording intervals. On the other hand, when the recording period is the same, the averaging effect is smoothed when the reporting period is annual. In case of Spain, in most of the electric utilities provided to domestic users the data which are recorded every 1 hour. Therefore, the PE may be too large for daily and annual reporting period. It is recommended to use a recording interval of one minute when a daily basis is used in order to estimate the $E_{PV,consumed}$. On the other hand, recording intervals of 15 minutes may be used in order to estimate the $E_{PV,consumed}$ on an annual basis because the PE is substantially reduced.

- Two methods to size the photovoltaic generator in a PV self-consumption system have been developed. First, a method which is based on cost-competitiveness and also maximizing the direct self-consumption. The second provides the size of the PV generator which maximizes the net present value. Both methods have been applied to three different load-profiles dwellings, located in the south of Spain. The three dwellings were monitored for one year. The size of the photovoltaic system, the self-consumption and self-sufficient indexes varied considerably depending on the method chosen. On the one hand, the PV generator sizes, which make the cost of self-consumed electricity lower than residential electricity price from the grid, has a range of the self-consumption index of 50-60% and the self-sufficiency index in the range of 37-45%. According to the results obtained, the method show that the cost of electricity generated by a self-consumption system could be lower than the residential electricity price from the grid when self-sufficiency indexes are close to 50%. On the other hand, two scenarios have been considered depending on whether the surplus electricity is not remunerated (scenario A) or whether it is remunerated (scenario B). Moreover, it has been considered tree electric utility tariffs: a single price in the whole time slot (One), two prices in two different time slots (One night) and three prices in three time slots (Tempo). The results show that scenario B has a greater window of PV array power, which makes the investment more profitable than the ones obtained in scenario A. The PV array sizes and the NPVs are also higher in scenario B. In scenario A, the self-consumption and self-sufficiency indexes have a range of 80-84% and 8-23%, in the three load-profiles dwellings when the One tariff is used. In addition, the value of both self-consumption and self-sufficiency indexes with the One Night or Tempo tariffs are within 76-81% y 9-25%, respectively. On the other hand, in scenario B, the self-consumption index has a range of 65-67% and the self-sufficiency index has a value between 11-31% when the One tariff is applied. Similarly to scenario A, when the tariff has different prices due to differentiation in times, the self-consumption indexes decrease subtly, 60-65%, and the self-sufficiency values are slightly increased, 11-34%. According to the proposed method, and for the houses which have been analyzed, the NPV is maximized with high self-consumption indexes and low self-sufficiency indexes, although it is possible to obtain self-sufficiency rates close to 50% in scenario B and the users achieve certain profitability. The chosen tariff is a key parameter in order to design the PV array in order to maximize the NPV. Although both methods have been applied to the case of Spain, they can easily be applied to other countries considering their corresponding techno-economic parameters.

It is important to highlight that stand-alone systems are relatively low-cost. Therefore, the approaches to solve the monitoring challenges should be easy and, in the same way, dependable with an adequate accuracy. Moreover, they should also be cost effective. Stand-alone systems are not usually monitored with data acquisition systems due to their

relative cost and a poor preventive maintenance. In this sense, further research should be addressed in order to design prototypes in which the proposed techniques will be implemented. The prototypes will use open source hardware/software.

On the other hand, the photovoltaic self-consumption systems in residential areas are relatively recent and the implementation of these systems will grow rapidly in the coming years. Therefore, design methods of sizing the photovoltaic generator as well the rest of the elements which are part of the photovoltaic system, are needed to address user objectives. The design methods will be used by the engineers and photovoltaic community, who are interested in nearly zero energy buildings. It must be highlighted that the self-consumed energy is a useful parameter not only from technical perspective, but also from the economic criterion. In this sense, the proposed approach for analyzing the influence of averaging $E_{PV,consumed}$ parameters should be applied in a greater number of consumption profiles and different localities. In addition, the effect of time-resolution will be evaluated based on different technical and economic parameters. Finally, the integral management and control of the monitoring in photovoltaic self-consumption may be a challenge because the large number of facilities are expected to grow while the systems will remain relatively small. This implies that the users will perform maintenance tasks or contract companies to do them. It might also be expected that monitoring systems will not only measure the data, but will also provide real time performance analysis and detection of malfunctions in order to help the preventive maintenance.

7. Referencias

- [1] European commission, Energía segura, limpia y eficiente / Retos sociales / Inicio - Horizonte2020, (n.d.).
<http://eshorizonte2020.cdti.es/index.asp?MP=87&MS=717&MN=2> (accessed November 22, 2018).
- [2] F. Nieuwenhout, M. Vervaart, P. van der Rijt, Monitoring of solar home systems in China: first year results, *Energy*. (2001) 1–4.
- [3] B.S. Reddy, P. Balachandra, H.S.K. Nathan, Universalization of access to modern energy services in Indian households-Economic and policy analysis, *Energy Policy*. 37 (2009) 4645–4657. doi:10.1016/j.enpol.2009.06.021.
- [4] 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. doi:10.1016/j.tej.2012.01.007.
- [5] Grupo de Trabajo Abierto de la Asamblea General, Consumo y producción sostenibles - Desarrollo Sostenible, (2015).
<http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/> (accessed February 28, 2018).
- [6] EUROPEAN COMMISSION, Energy 2020. A strategy for competitive, sustainable and secure energy, *Commun. FROM Comm. TO Eur. Parliam. Counc. Eur. Econ. Soc. Comm. Comm. Reg.* (2010) 21. doi:COM(2010) 639.
- [7] REN21, Renewables 2018 global status report. A comprehensive annual overview of the state of renewable energy., Paris, 2018. doi:978-3-9818911-3-3.
- [8] D.P. Kaundinya, P. Balachandra, N.H. Ravindranath, Grid-connected versus stand-alone energy systems for decentralized power-A review of literature, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13 (2009) 2041–2050. doi:10.1016/j.rser.2009.02.002.
- [9] P. Sandwell, N.L.A. Chan, S. Foster, D. Nagpal, C.J.M. Emmott, C. Candelise, S.J. Buckle, N. Ekins-Daukes, A. Gambhir, J. Nelson, Off-grid solar photovoltaic systems for rural electrification and emissions mitigation in India, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 156 (2016) 147–156. doi:10.1016/J.SOLMAT.2016.04.030.
- [10] V. Salas, Stand-alone photovoltaic systems, in: *Perform. Photovolt. Syst.*, 2016: pp. 149–160. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-336-2.00009-4>.
- [11] K. Ghaib, F.-Z. Ben-Fares, A design methodology of stand-alone photovoltaic power systems for rural electrification, *Energy Convers. Manag.* 148 (2017) 1127–1141.
- [12] T. Alnejaili, S. Drid, D. Mehdi, L. Chrifi-Alaoui, R. Belarbi, A. Hamdouni, Dynamic control and advanced load management of a stand-alone hybrid renewable power system for remote housing, *Energy Convers. Manag.* 105 (2015) 377–392. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.07.080>.
- [13] G. Almonacid, F.J. Muñoz, J. de la Casa, J.D. Aguilar, Integration of PV systems on health emergency vehicles. FIVE project, *Prog. Photovoltaics*. 12 (2004) 609–

621. doi:10.1002/pip.558.
- [14] X. Lemaire, Fee-for-service companies for rural electrification with photovoltaic systems : The case of Zambia, *Energy Sustain. Dev.* 13 (2009) 18–23. doi:10.1016/j.esd.2009.01.001.
- [15] D. Palit, A. Chaurey, Off-grid rural electrification experiences from South Asia : Status and best practices, *Energy Sustain. Dev.* 15 (2011) 266–276. doi:10.1016/j.esd.2011.07.004.
- [16] I. Orlandi, N. Tyabji, J. Chase, M. Wilshire, B. Vickers, Off-grid solar market trends report 2016, 2016. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- [17] International Renewable Energy Agency, Off-Grid Renewable Energy Systems: Status and Methodological Issues, 2015. http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Off-grid_Renewable_Systems_WP_2015.pdf.
- [18] IRENA (2018), Off-grid renewable energy solutions: Global and regional status and trends, 2018. doi:978-92-9260-076-1.
- [19] International Energy Agency, Energy Access Outlook 2017: From poverty to prosperity, 2017. doi:10.1787/9789264285569-en.
- [20] IRENA (International Renewable Energy Agency), REthinking Energy 2017: Accelerating the global energy transformation, Irena, Abu Dhabi, 2017.
- [21] Bloomberg NEF, New Energy Outlook 2018, (n.d.). <https://bnf.turtl.co/story/neo2018?teaser=true> (accessed May 10, 2019).
- [22] DNV GL, Energy transition outlook 2018 oil and gas, (2018) 96.
- [23] I. Wittenberg, A. Blöbaum, E. Matthies, Environmental motivations for energy use in PV households: Proposal of a modified norm activation model for the specific context of PV households, *J. Environ. Psychol.* 55 (2018) 110–120. doi:10.1016/J.JENVP.2018.01.002.
- [24] M. Haegermark, P. Kovacs, J.O. Dalenbäck, Economic feasibility of solar photovoltaic rooftop systems in a complex setting: A Swedish case study, *Energy.* 127 (2017) 18–29. doi:10.1016/j.energy.2016.12.121.
- [25] R. Khalilpour, A. Vassallo, Leaving the grid: An ambition or a real choice?, *Energy Policy.* 82 (2015) 207–221. doi:10.1016/j.enpol.2015.03.005.
- [26] DNV GL, ENERGY TRANSITION OUTLOOK 2018 POWER SUPPLY Forecast to 2050, (2018) 96.
- [27] F. Nemry, A. Uihlein, JRC Scientific and technical Reports. Environmental Improvement Potentials of Residential Buildings (IMPRO-Building), 2008. doi:10.2791/38942.
- [28] Bosseboeuf et al., Energy Efficiency Trends and Policies in the Household and Tertiary Sectors, 2015.
- [29] Eurostat, Energy Data. Main tables, (2019). <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/main-tables> (accessed March 21, 2019).

- [30] X. Cao, X. Dai, J. Liu, Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade, *Energy Build.* 128 (2016) 198–213. doi:10.1016/j.enbuild.2016.06.089.
- [31] Z. Liu, Y. Liu, B.J. He, W. Xu, G. Jin, X. Zhang, Application and suitability analysis of the key technologies in nearly zero energy buildings in China, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 101 (2019) 329–345. doi:10.1016/j.rser.2018.11.023.
- [32] E. Recast, Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast), *Off. J. Eur. Union.* 18 (2010) 2010.
- [33] A.R. Amaral, E. Rodrigues, A. Rodrigues Gaspar, Á. Gomes, Review on performance aspects of nearly zero-energy districts, *Sustain. Cities Soc.* 43 (2018) 406–420. doi:10.1016/J.SCS.2018.08.039.
- [34] D. D'Agostino, P. Zangheri, Development of the NZEBs concept in Member States, *EUR 28252 EN*, 2016. doi:10.2788/278314.
- [35] I. Renewable Energy Agency, Renewable Power Generation Costs in 2017, 2018. doi:10.1007/SpringerReference_7300.
- [36] International Energy Agency, Trends 2018 in photovoltaic applications 23. Report IEA PVPS T1-34:2018, 2018.
- [37] A. JÄGER-WALDAU, JRC Science for policy report. PV status report 2018, 2018. doi:10.2760/826496.
- [38] S. Sen, S. Ganguly, Opportunities, barriers and issues with renewable energy development -A discussion, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 69 (2017) 1170–1181. doi:10.1016/j.rser.2016.09.137.
- [39] T. Ma, H. Yang, L. Lu, Long term performance analysis of a standalone photovoltaic system under real conditions, *Appl. Energy.* 201 (2017) 320–331. doi:10.1016/j.apenergy.2016.08.126.
- [40] K. Bücher, Site dependence of the energy collection of PV modules, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 47 (1997) 85–94. doi:10.1016/S0927-0248(97)00028-7.
- [41] K. Deli, E. Tchoffo Houdji, N. Djongyang, D. Njomo, Operation and maintenance of back-up photovoltaic systems: An analysis based on a field study in Cameroon, *African J. Sci. Technol. Innov. Dev.* 9 (2017) 1–12. doi:10.1080/20421338.2017.1341731.
- [42] L.R. Valer, A.R.A. Manito, T.B.S. Ribeiro, R. Zilles, J.T. Pinho, Issues in PV systems applied to rural electrification in Brazil, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 78 (2017) 1033–1043. doi:10.1016/j.rser.2017.05.016.
- [43] International energy agency, Photovoltaic module energy yield measurements: Existing approaches and best practice, 2018. <http://www.iea-pvps.org/index.php?id=493>.
- [44] 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. doi:10.1016/j.solmat.2005.10.020.

- [45] C. Rus-Casas, L. Hontoria, J.I. Fernández-Carrasco, G. Jiménez-Castillo, F. J Muñoz-Rodríguez, Development of a Utility Model for the Measurement of Global Radiation in Photovoltaic Applications in the Internet of Things (IoT), *Electronics*. 8 (2019) 304. doi:10.3390/electronics8030304.
- [46] M. Jiménez-Torres, C. Rus-Casas, L.G. Lemus-Zúiga, L. Hontoria, The Importance of Accurate Solar Data for Designing Solar Photovoltaic Systems—Case Studies in Spain, *Sustainability*. 9 (2017) 247.
- [47] S. Daliento, A. Chouder, P. Guerriero, A.M. Pavan, A. Mellit, R. Moeini, P. Tricoli, Monitoring, diagnosis, and power forecasting for photovoltaic fields: A review, *Int. J. Photoenergy*. 2017 (2017). doi:10.1155/2017/1356851.
- [48] K. Kalaitzakis, E. Koutroulis, V. Vlachos, Development of a data acquisition system for remote monitoring of renewable energy systems, *Meas. J. Int. Meas. Confed.* 34 (2003) 75–83. doi:10.1016/S0263-2241(03)00025-3.
- [49] H. Rezk, I. Tyukhov, M. Al-Dhaifallah, A. Tikhonov, Performance of data acquisition system for monitoring PV system parameters, *Meas. J. Int. Meas. Confed.* 104 (2017) 204–211. doi:10.1016/j.measurement.2017.02.050.
- [50] O. Kebour, A. Hadj Arab, A. Hamid, K. Abdeladim, Contribution to the analysis of a stand-alone photovoltaic system in a desert environment, *Sol. Energy*. 151 (2017) 68–81. doi:10.1016/j.solener.2017.05.009.
- [51] F.D.J. Nieuwenhout, A. Van Dijk, P.E. Lasschuit, G. Van Roekel, V.A.P. Van Dijk, D. Hirsch, H. Arriaza, M. Hankins, B.D. Sharma, H. Wade, Experience with solar home systems in developing countries: A review, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* 9 (2001) 455–474. doi:10.1002/pip.392.
- [52] IRENA, Accelerating off-grid renewable energy: IOREC 2014: Key findings and recommendations, *Int. Off-Grid Renew. Energy Conf. Exhib.* 2 (2014). http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_2nd_IOREC_2015.pdf.
- [53] J. Yaungket, T. Tezuka, A survey of remote household energy use in rural Thailand, *Energy Procedia*. 34 (2013) 64–72.
- [54] T. Urmee, D. Harries, A. Schlapfer, Issues related to rural electrification using renewable energy in developing countries of Asia and Pacific, *Renew. Energy*. 34 (2009) 354–357.
- [55] N.J. Williams, E.E. van Dyk, F.J. Vorster, Monitoring Solar Home Systems With Pulse Width Modulation Charge Control, *J. Sol. Energy Eng.* 133 (2011) 021006. doi:10.1115/1.4003586.
- [56] IEC, IEC 61724-1 Edition 1.0 2017-03 Photovoltaic system performance – Part 1: Monitoring IEC, Edition 1., IEC publications, Geneva, 2017.
- [57] IEEE Instrumentation and Measurement Society, IEEE Standard for Transitions , Pulses , and Related Waveforms, 2011. doi:10.1109/IEEESTD.2003.94394.
- [58] A.N.S. Institute, IEEE Recommended Practice for Testing the Performance of Stand-Alone Photovoltaic Systems, 2001 (2001).
- [59] F.J. Muñoz, M. Torres, V. Muñoz, M. Fuentes, Monitoring Array Output Current

- and Voltage in Stand Alone Photovoltaics Systems With Pulse Width Modulated Charge Regulators, *J. Sol. Energy Eng.* 135 (2013). doi:10.1115/1.4007939.
- [60] A. Ayala-Gilardón, M. Sidrach-de-Cardona, L. Mora-López, Influence of time resolution in the estimation of self-consumption and self-sufficiency of photovoltaic facilities, *Appl. Energy*. 229 (2018) 990–997. doi:10.1016/j.apenergy.2018.08.072.
- [61] R. Luthander, J. Widén, D. Nilsson, J. Palm, Photovoltaic self-consumption in buildings: A review, *Appl. Energy*. 142 (2015) 80–94. doi:10.1016/j.apenergy.2014.12.028.
- [62] T. Beck, H. Kondziella, G. Huard, T. Bruckner, Assessing the influence of the temporal resolution of electrical load and PV generation profiles on self-consumption and sizing of PV-battery systems, *Appl. Energy*. 173 (2016) 331–342. doi:10.1016/j.apenergy.2016.04.050.
- [63] S. Cao, K. Sirén, Impact of simulation time-resolution on the matching of PV production and household electric demand, *Appl. Energy*. 128 (2014) 192–208. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.075.
- [64] K. Sørnes, E. Fredriksen, K. Tunheim, I. Sartori, Analysis of the impact resolution has on load matching in the Norwegian context, *Energy Procedia*. 132 (2017) 610–615.
- [65] P. Wolf, J. Včelák, Simulation of a simple PV system for local energy usage considering the time resolution of input data, *J. Energy Storage*. 15 (2018) 1–7. doi:10.1016/j.est.2017.10.009.
- [66] N. Wyrsh, Y. Riesen, C. Ballif, Effect of the fluctuations of pv production and electricity demand on the pv electricity self-consumption, in: *Proc. 28th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib.*, 2013: pp. 4322–4324. doi:10.4229/28thEUPVSEC2013-5BV.7.77.
- [67] J. Linssen, P. Stenzel, J. Fler, Techno-economic analysis of photovoltaic battery systems and the influence of different consumer load profiles, *Appl. Energy*. 185 (2017) 2019–2025. doi:10.1016/j.apenergy.2015.11.088.
- [68] I. Bendato, A. Bonfiglio, M. Brignone, F. Delfino, F. Pampararo, R. Procopio, M. Rossi, Design criteria for the optimal sizing of integrated photovoltaic-storage systems, *Energy*. 149 (2018) 505–515. doi:10.1016/j.energy.2018.02.056.
- [69] S. Schopfer, V. Tiefenbeck, T. Staake, Economic assessment of photovoltaic battery systems based on household load profiles, *Appl. Energy*. 223 (2018) 229–248. doi:10.1016/j.apenergy.2018.03.185.
- [70] J. Vimpari, S. Junnila, Estimating the diffusion of rooftop PVs: A real estate economics perspective, *Energy*. 172 (2019) 1087–1097. doi:10.1016/j.energy.2019.02.049.
- [71] T. Kaschub, P. Jochem, W. Fichtner, Solar energy storage in German households: profitability, load changes and flexibility, *Energy Policy*. 98 (2016) 520–532. doi:10.1016/j.enpol.2016.09.017.
- [72] M.H. Chang, D. Das, P. V. Varde, M. Pecht, Light emitting diodes reliability review, *Microelectron. Reliab.* 52 (2012) 762–782.

- doi:10.1016/j.microrel.2011.07.063.
- [73] P. Hallberg, Final guidelines of good practice on regulatory aspects of smart metering for electricity and gas, Eur. Regul. Gr. Electr. Gas, Counc. Eur. Energy Regul. ASBL, Brussels. (2011).
- [74] Z. Hameiri, Photovoltaics literature survey (No. 146), Prog. Photovoltaics Res. Appl. 26 (2018) 1007–1012. doi:10.1002/pip.3092.

1. Relación de publicaciones

- [1] **G. Jiménez-Castillo**, F.J. Muñoz-Rodríguez, C. Rus-Casas, J.C. Hernández, G.M. Tina, Monitoring PWM signals in stand-alone photovoltaic systems, *Measurement*. 134 (2019) 412–425. Doi:10.1016/j.measurement.2018.10.075
- [2] **G. Jiménez-Castillo**, F.J. Muñoz-Rodríguez, C. Rus-Casas, P.G. Vidal, Improvements in array power monitoring in Pulse-Width Modulation charge controllers, *Sensors*. 19 (2019) 2150. Doi:10.3390/s19092150.
- [3] **G. Jiménez-Castillo**, G. M. Tina, F. J. Muñoz-Rodríguez and C. Rus-Casas, "Smart meters for the evaluation of self-consumption in zero energy buildings," 2019 10th International Renewable Energy Congress (IREC), Sousse, Tunisia, 2019, pp. 1-6, Doi: 10.1109/IREC.2019.8754609.
- [4] 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. Doi:https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.088.
- [5] **G. Jiménez-Castillo**, F.J. Muñoz-Rodríguez, C. Rus-Casas, D.L. Talavera, A new approach based on economic profitability to sizing the photovoltaic generator in self-consumption systems without storage, *Renew. Energy*. 148 (2020) 1017-1033. Doi: 10.1016/j.renene.2019.10.086.

Referencia / Reference:

G. Jiménez-Castillo, F.J. Muñoz-Rodríguez, C. Rus-Casas, J.C. Hernández, G.M. Tina, Monitoring PWM signals in stand-alone photovoltaic systems, *Measurement*. 134 (2019) 412–425.

Doi:10.1016/j.measurement.2018.10.075

Estado / Status: Publicado / *Published*.

Índice de impacto / Impact Factor: 3.364.

Categoría / Category: *Instruments & Instrumentation*. Ranking (2019): 13/64 (Q1).

Engineering, multidisciplinary. Ranking (2019): 22/91 (Q1).

Abstract:

The performance of stand-alone photovoltaic (SAPV) systems can be evaluated by monitoring them in the field using data acquisition systems (DASs). Most SAPV systems use battery charge controllers with pulse width modulation (PWM) to regulate the current into the battery. The PWM signals generated by battery charge controllers imply monitoring challenges due to the complexity of this type of signal. In this sense, the aim of this paper is to develop a new and simple monitoring technique for SAPV systems which can estimate the signals provided by a PWM battery charge controller, thus avoiding expensive DASs, simultaneous sampling and the huge amount of collected data. The estimation of PWM signal parameters, such as the duty factor (d_r) or high and low states, shows high accuracy, with the mean absolute percentage error lower than 1.4%, a mean relative error within 1.4%, and the coefficient of determination higher than 0.9. Furthermore, the proposed technique may easily be used for other electrical devices where PWM is employed.

Referencia / Reference:

G. Jiménez-Castillo, F.J. Muñoz-Rodríguez, C. Rus-Casas, P.G. Vidal, Improvements in array power monitoring in Pulse-Width Modulation charge controllers, *Sensors*. 19 (2019) 2150.

Doi:10.3390/s19092150.

Estado / Status: Publicado / *Published*.

Índice de impacto / Impact Factor: 2.475.

Categoría / Category: *Instruments & Instrumentation*. Ranking (2019): 15/64 (Q1).
Engineering, Electrical & Electronic. Ranking (2019): 77/266 (Q2).

Abstract:

Various challenges should be considered when measuring photovoltaic array power and energy in pulse width modulation (PWM) charge controllers. These controllers are frequently used not only in stand-alone photovoltaic (SAPV) systems, but may also be found in photovoltaic (PV) self-consumption systems with battery storage connected to the electricity grid. An acceptable solution may be reached using expensive data acquisition systems (DASs), although this could be generally disproportionate to the relatively low cost of SAPV systems. Therefore, the aim of this paper is to develop new and effective monitoring techniques which will provide the PV array direct current (DC), output power ($P_{A,dc}$), and PV array DC output energy (EA), thus avoiding the use of sophisticated DASs and providing high accuracy for the calculated parameters. Only transducers and electronic circuits that provide the average and true rms values of the PWM signals are needed. The estimation of these parameters through the aforementioned techniques showed high accuracy for both series and shunt PWM battery charge controllers. Normalized root mean square error (NRMSE) was lower than 2.4%, normalized mean bias error (NMBE) was between -1.5% and 1.1%, and mean absolute percentage error (MAPE) was within 1.6%.

Referencia / Reference:

G. Jiménez-Castillo, G. M. Tina, F. J. Muñoz-Rodríguez and C. Rus-Casas, "Smart meters for the evaluation of self-consumption in zero energy buildings," 2019 10th International Renewable Energy Congress (IREC), Sousse, Tunisia, 2019, pp. 1-6, Doi: 10.1109/IREC.2019.8754609

Estado / Status: Publicado / *Published*.

Índices de calidad: incluido en el IEEE Conference Publication Program (CPP) y tiene como canal de difusión IEEE Xplore®, ello implica que esté 'abstracting and indexing' (A&I) en Scopus, Web of Science, ProQuest, The Institution of Engineering and Technology, US National Library of Medicine y CrossRef

Abstract:

Smart grids are not only considered as the solution of a great number of challenges for electricity systems, but also the path to move to a low carbon economy. Photovoltaic self-consumption may play a key role in speeding up such a transition especially in the context of zero energy buildings. The control and management of a smart grid is made by updating energetic and economic parameters such as the load consumption and the photovoltaic generation through smart connected devices, which provide real time operation and energy measurements. This work analyses the error when matching the load consumption and photovoltaic generation profiles. Different recording intervals and reporting periods in a photovoltaic self-consumption system are considered. The PV system rating ranges from 0.01 to 10kWp. The upper value has been chosen as it may constitute an upper limit for conventional households.

Referencia / Reference:

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. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.088>

Estado / Status: Publicado / *Published*.

Índice de impacto / Impact Factor: 6.274.

Categoría / Category: Energy & Fuels. Ranking (2019): 19/112 (Q1).

Este trabajo de investigación ha sido mencionado en el número de Photovoltaics literature survey (Nº 146) como uno de los artículos para mantenerse al día en el campo de la fotovoltaica que se encuentran en las revistas más relevantes [74].

Abstract:

Applications for sizing Photovoltaic (PV) self-consumption systems have been studied over recent years in order to achieve either an optimization of the cost of energy, the investment cost or any economic profitability criteria. However, PV self-consumption systems at the residential or small business level can be designed with the aims of reducing the electricity consumption from the conventional local grid and achieving competitiveness with grid electricity prices. These criteria will provide not only greater environmental benefits, security and independence of the grid but it will make the cost of PV self-consumption electricity competitive with electricity prices from the power grid. In this sense, this paper proposes a method to size the generator for a PV self-consumption system based on cost-competitiveness, maximizing direct self-consumption. The method will be applied for three different households located in the south of Spain using the household daily consumption and generation profiles for a single year. However, the method here illustrated can be applied to other countries. The results obtained suggest that residential direct PV self-consumption systems with an annual global irradiation at the optimal tilt angle higher than 1000 kWh/(m²·year) may be a feasible investment to future owners of these systems.

Referencia / Reference:

G. Jiménez-Castillo, F. J. Muñoz-Rodríguez*, C. Rus-Casas, D.L. Talavera, A new approach based on economic profitability to sizing the photovoltaic generator in self-consumption systems without storage, *Renew. Energy*. 148 (2020) 1017-1033.

Doi: 10.1016/j.renene.2019.10.086.

Estado / Status: Publicado / *Published*.

Índice de impacto / Impact Factor: 8.001.

Categoría / Category: Energy & Fuels. Ranking (2020): 16/114 (Q1).

Abstract:

A proper assessment of the cost-competitiveness and profitability of self-consumption systems is crucial to promoting the transition from grid-dependent to energy self-sufficient buildings. Most of the approaches found in the literature may not take into account economic parameters such as taxes, depreciation and the cost of financing, which have a significant effect on the economic profitability of an investment. Moreover, they only focus on discrete array powers and relatively high recording intervals when estimating the self-consumed energy. In order to manage the aforementioned challenges, a new method will be developed to size the PV generator in a PV self-consumption system which provides the NPV curve together with the self-consumption and self-sufficiency indices for a wide range of array powers which suits residential self-consumption systems. Two scenarios will be considered depending on whether the generated surplus electricity is wasted or it is remunerated from the grid operator. Results show that not only the chosen scenario but the electricity tariff may be key parameters when optimizing NPV. Furthermore, the impact of the recording interval may be significant when estimating NPV. Percentage errors of 11.4% and 33.6% may be reached when considering a recording interval of 15 and 60 min, respectively.

2. Artículos indexados JCR generados en el marco de la tesis

La siguiente relación de artículos indexados en JCR se han generado dentro del marco de la presente tesis:

[1] C. Rus-Casas, L. Hontoria, J.I. Fernández-Carrasco, **G. Jiménez-Castillo**, F. J Muñoz-Rodríguez, Development of a Utility Model for the Measurement of Global Radiation in Photovoltaic Applications in the Internet of Things (IoT), *Electronics*. 8 (2019) 304. doi:10.3390/electronics8030304.

Estado / Status: Publicado / *Published*.

Índice de impacto / Impact Factor: 2.412.

Categoría / Category: *Engineering, Electrical & Electronic*. Ranking (2019): 125/266 (Q2).

[2] F.J. Muñoz, **G. Jiménez**, M. Fuentes, J.D. Aguilar, Power Gain and Daily Improvement Factor in Stand-Alone Photovoltaic Systems With Maximum Power Point Tracking Charge Regulators. Case of Study: South of Spain, *J. Sol. Energy Eng.* 135 (2013) 041011. doi:10.1115/1.4025205

Estado / Status: Publicado / *Published*.

Índice de impacto / Impact Factor: 1.132.

Categoría / Category: *Energy & Fuels*. Ranking (2013): 49/83 (Q3).

Engineering, Mechanical. Ranking (2013): 47/128 (Q2).

3. Comunicaciones a congresos y conferencias internacionales

[1] M. Jiménez-Torres, L. Hontoria, P.G. Vidal, J.C. Hernández, **G. Jiménez-Castillo**, C.R.- Casas, Tools for increasing the use of renewables energies based on photovoltaic systems. Development of a GUI for the monitoring of the solar resource., in: ScienceKnowconferences (Ed.), Extrending Abstr. Book. 7th Int. Congr. Energy Environ. Eng. Manag. 17-19 July 2017, Canar. Islands, SPAIN, 2017: pp. 209–212.

[2] **G. Jiménez-Castillo**, F.J. Muñoz-Rodríguez, G. Almonacid, J.. Fernández-Carrasco, B. Ogayar, C. Rus-Casas, New techniques to improve Photovoltaic Systems Monitoring, in: ScienceKnowconferences (Ed.), Extrending Abstr. Book. 7th Int. Congr. Energy Environ. Eng. Manag. 17-19 July 2017, Canar. Islands, SPAIN, 2017: pp. 113–116.