



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

Estudio sobre la viabilidad de una instalación de  
autoconsumo fotovoltaica en una industria de  
Teruel

Autor

René de Jesús Pérez Toledo

Directores

Raúl Igual Catalán  
Raúl Martín Ferrer

Escuela Universitaria Politécnica de Teruel

2021



## *Resumen*

El objetivo fundamental de este Trabajo de Fin de Grado es realizar un estudio profesional y exhaustivo, sobre las diferentes, mejores y más adecuadas formas de realizar una instalación fotovoltaica, ejemplificado para el caso de una industria de tratamiento de madera real de Teruel, en base a las demandas y requerimientos del propietario de esta industria como supuesto cliente.

El trabajo fin de grado comienza con el análisis de la energía solar fotovoltaica y de los componentes que se utilizan en las instalaciones de autoconsumo, centrándose en cómo y cuál ha sido su avance tecnológico con el paso del tiempo, cuál es el estado actual de dicho avance, y qué previsiones o demandas de futuro se le asocian o se esperan.

A continuación, se realiza un estudio profesional de la demanda energética de la industria, a partir de mediciones realizadas con un analizador de redes. Después, tras obtener la información requerida asociada a la demanda energética, se discierne sobre cuál es la opción más adecuada, en términos de optimización, eficiencia y compatibilidad con los requerimientos del cliente, de realizar la instalación, aportando los resultados obtenidos de los diferentes análisis y comparándolos entre sí.

Se ha pretendido abarcar todas las partes dignas de estudio en un proyecto de este tipo, desde el estudio técnico asociado a las características de las instalaciones de autoconsumo fotovoltaicas y los componentes utilizados, hasta la recogida de datos "in situ" en la industria con aparatos de medida, siguiendo con el estudio técnico, matemático, normativo y económico necesario a seguir para conformar una instalación de autoconsumo correctamente.

## *Abstract*

The main objective of this Final Degree Project is to carry out a professional and exhaustive study of the different, best and most appropriate ways to carry out a photovoltaic installation, exemplified in the case of a real wood treatment industry in Teruel. It is based on the demands and requirements of the owner of the industry.

This final degree project presents photovoltaic solar energy and the components used in self-consumption facilities, focusing on the technological advances. It focuses on present and future demands and projections.

Then, a professional study of energy demand in the industry is carried out, based on measurements made with a power analyzer. Then, after obtaining the required information associated with energy demand, it is discerned which is the most appropriate option, in terms of optimization, efficiency and compatibility with customer requirements. Results obtained from different analysis are provided and compared.

Thus, this project covers different steps of photovoltaic design: the technical study associated with the characteristics of the photovoltaic self-consumption facilities, their component, collection of real data in an industry, etc. Then, technical, mathematical, normative and economic studies are performed to design a self-consumption installation properly.

## *Agradecimientos*

Este apartado está dedicado a ofrecer mis más sinceros agradecimientos a todas aquellas personas que han contribuido a poder realizar este Trabajo de Fin de Grado tal y como ha resultado, y a poder completar mi carrera académica de la forma en la que lo he conseguido hacer.

- En primer lugar, me gustaría agradecer a mi director de trabajo Raúl Igual Catalán. Él ha sido el que, en un primer momento, a la hora de plantear mi propuesta original de TFG, me guió y aconsejó acerca de por dónde debía orientar mi trabajo y por dónde no, en función de qué poseía más relevancia y qué era más oportuno realizar.

Él también fue el que, sin yo pedírselo, me ofertó el analizador de redes y me aconsejó realizar el estudio plasmado en el anexo cinco. Gracias a esto, he aprendido a utilizar un aparato de medición profesional, y he sabido utilizarlo correctamente para aplicaciones de interés laboral, como puede ser la toma de medidas en una industria real, que permita conocer la curva de consumo energético (demanda energética) asociada a una industria sobre la que se plantea instalar una instalación de autoconsumo fotovoltaico.

A su vez, también agradezco el esfuerzo que Raúl Igual ha realizado para plasmar, en un conjunto de vídeos que proporciona en su canal de Youtube, orientaciones sobre cómo realizar correcta y profesionalmente una memoria de un Trabajo Fin de Grado.

*El link del canal de Youtube de Raúl Igual Catalán se presenta a continuación:*  
<https://www.youtube.com/channel/UCI1laxEEpiQ0Zb3ATNCpJdq>.

*El link que dirige a la lista de reproducción dónde se encuentran todos los videos realizados y mencionados se presenta a continuación:*  
<https://www.youtube.com/playlist?list=PLd0q5vDieF2XEO7YPCxxQ1UYNqwdYzrsB>.

- En segundo lugar, me gustaría agradecer la disponibilidad y amabilidad ofrecida por el codirector de este trabajo, Raúl Martín Ferrer. Él me permitió acceder a su fábrica, y me ayudó a la hora de realizar las mediciones correspondientes en la misma. Él también me proporcionó la información que necesité para poder acceder a los datos reales del consumo energético de la industria, a partir de la página web de la empresa distribuidora. Él me proporcionó toda la información que necesité conocer acerca de su industria, y me aconsejó acerca de cuál era la mejor manera de utilizar los datos proporcionados y obtenidos.

También agradezco su esfuerzo a la hora de desplazarme, a tempranas horas de la mañana (cuando empieza la jornada laboral), a la fábrica.

Espero que todo el esfuerzo dedicado a este trabajo, plasmado en la teoría y en los análisis y resultados citados, sirva de ayuda a Raúl Martín para, por lo menos, guiarle cuando lo necesite en el mundo de la energía solar fotovoltaica y las instalaciones de autoconsumo fotovoltaico.

- En tercer lugar, quiero agradecer a todos los familiares que, a lo largo de toda mi etapa académica, incluyendo la universitaria, me han otorgado las condiciones propicias, que todo estudiante necesita, para poder cumplir con éxito sus objetivos académicos.

Quiero resaltar el aporte realizado por mi madre (en términos de esfuerzo y económicos), Fátima Toledo Álvarez, incansable luchadora que puede observar y confirmar, a partir de los logros académicos conseguidos hasta día de hoy, 9 de septiembre de 2021, que todo el esfuerzo que ha realizado para sacarnos adelante a mi hermano y a mí ha valido la pena, por lo menos en términos académicos. Te estoy eternamente agradecido mamá por todo el esfuerzo que has realizado sobre mí y sobre tu hijo Juan, y todo el esfuerzo y sacrificio que he dedicado a este trabajo y a mi vida académica, para asegurarte tranquilidad en ese sentido, lo demuestra.

También quiero resaltar el aporte realizado por mi tía, Nery Regina Toledo Álvarez, y por mi tío, Juan Antonio Julve Moreno. Es incalculable el apoyo que ellos me han dado. Ellos han sido quienes me han proporcionado las herramientas, emocionales, del entorno y económicas, que han permitido sacar adelante mi carrera académica universitaria y de bachiller.

A mi tía le agradezco su cariño incondicional y el “arropamiento” emocional que siempre me ha proporcionado. Sé que ella siempre ha actuado por mi bien, y por hacerme ser una mejor y más fuerte persona.

A mi tío, a quién considero el padre que nunca he tenido y que siempre he necesitado, agradezco todo el conocimiento que me ha proporcionado a lo largo de los últimos siete años que he convivido con él. Él me ha enseñado a ser una persona más fuerte, independiente, y que sabe distinguir mejor a qué se le debe dar realmente importancia, y a qué no. Él ha contribuido en gran medida a conformar la personalidad que poseo y que quiero poseer, siempre basado en el cumplimiento de los valores éticos y morales que todo ser humano debe tener como referencia. Te estaré eternamente agradecido tito, por todo lo que me has aportado, cuyo valor es indudablemente incalculable, que Dios te bendiga.

También agradezco al apoyo otorgado por mi hermano Juan José Pérez Toledo y demás familiares, como mi prima Kenia y allegados, que me han proporcionado ánimo y apoyo emocional en todas aquellas ocasiones en las que lo he necesito y los he requerido. Muchas gracias de corazón.

- En cuarto lugar, quiero agradecer el aporte realizado por todos mis amigos y compañeros académicos, entre los que destaco a Sergio Domínguez, Ernesto Lozano, Youssef Litim, Alberto Alonso, Luís Manuel, Denis Florín, Gonzalo Esteban y Carlos Ballestín. A todos aquellos no mencionados, les habré expresado mi agradecimiento cuando correspondiera a lo largo de toda mi vida académica.

Ellos me han proporcionado una vía de escape a todas aquellas sensaciones emocionales, como son la presión, angustia, ansiedad, etc., que el estudiante siente durante su vida académica. Por ello, os doy las gracias.

- En quinto y último lugar, quiero agradecer a todo el profesorado con el que he tenido la gran fortuna de coincidir a lo largo de mi vida académica. Ellos me han enseñado que las cosas, para ganárselas, hay que trabajarlas, y que nada importante se consigue de

la noche a la mañana, sin requerir esfuerzo, disciplina, constancia, y bien hacer, entre otros valores fundamentales.

Ellos han contribuido a permitirme obtener todo el conocimiento que poseo a día de hoy, en los diferentes ámbitos del conocimiento.

El conocimiento es poder, y hace que la vida de las personas sea mucho más sencilla y tranquila, por ello, nunca se debe dejar de querer conocer.

*\* Se agradece a la empresa Autodesk que disponga de licencias educativas de AutoCAD y otros softwares desarrollados por la misma, que hagan que aquellos estudiantes que, o no pueden permitírselo, o que simplemente quieran aprender a diseñar gráficamente, tengan la oportunidad de hacerlo.*



---

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

---

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
Apartado 1. Motivación.....	1
Apartado 2. Objetivos.....	2
Apartado 3. Introducción a la energía solar fotovoltaica. Ámbitos de aplicación, ventajas y desventajas. ....	2
3.1 Ámbitos de aplicación [4].....	3
3.2 Ventajas y Desventajas de la energía solar fotovoltaica.....	3
Apartado 4. Energía solar fotovoltaica. Tipos de instalación. Componentes fundamentales y tecnologías asociadas.....	4
4.1 Tipos de instalaciones fotovoltaicas [5]. ....	4
4.2 Componentes fundamentales de una instalación fotovoltaica y tecnologías asociadas....	5
4.3 Célula fotoeléctrica. Información básica y tipología de células existentes en la actualidad. ....	5
4.3.1 Tipología de células en función de la cristalización del silicio.....	6
4.4 Paneles fotovoltaicos. Partes constituyentes y formas de disposición. Tecnologías más innovadoras utilizadas en la actualidad. ....	6
4.4.1 Partes constituyentes del panel fotovoltaico [13–15]. ....	7
4.4.2 Formas de disposición de los paneles. Constitución del campo fotovoltaico [16]. ....	7
4.4.3 Tecnologías más innovadoras presentes en los paneles [15]. ....	8
4.5 Inversor solar. Tipología de inversores y características asociadas.....	8
4.5.1 Tipología de inversores. Información básica fundamental. ....	8
4.6 Regulador de carga y sistemas de almacenamiento: baterías.....	10
4.7 Infraestructura eléctrica [24,25]. ....	10
Apartado 5. Legislación vigente asociada a las instalaciones de autoconsumo fotovoltaicas en España. Configuración asociada a las propuestas de instalación planteadas. Objetivos y viabilidad.....	11
5.1 Legislación actual aplicable en España. Ámbito de aplicación.....	11

5.2 Configuración legislativa asociada a las propuestas de instalación planteadas y estudiadas. .....	11
<b>DESARROLLO .....</b>	<b>12</b>
Apartado 1. Analizador de redes. Descripción, objetivos y elementos utilizados. Configuración establecida y resultados obtenidos. ....	12
1.1 Instrumentos auxiliares utilizados. Función y configuración asociadas.....	13
1.2 Mediciones reales realizadas en la industria. ....	14
Apartado 2. Estudio sobre la viabilidad de la instalación de un sistema de autoconsumo fotovoltaico en una industria real de Teruel. Características fundamentales de la industria. Demandas del cliente.....	21
2.1 Características generales y más relevantes de la industria. Aprovechamiento de sus recursos en relación al análisis a realizar. Demandas del cliente. ....	21
2.1.1 Información básica de la industria objeto de estudio.....	21
2.1.2 Características más relevantes de la instalación.....	22
2.1.3 Demandas del propietario de la industria.....	22
2.2 Estudio de viabilidad, asociado a las características y recursos aprovechables por la industria. ....	23
2.3 Conclusión. ....	26
Apartado 3. Dimensionado de la potencia de la instalación de autoconsumo fotovoltaica [28,29].....	26
3.1 Curva de demanda energética y curva de producción. Cobertura de demanda y aprovechamiento fotovoltaico [28]. ....	27
3.2 Obtención de la potencia óptima a asignar para cada propuesta de instalación. Balance energético asociado. ....	28
3.2.1 Propuesta 1. Potencia asignada y resultados obtenidos. ....	29
3.2.2 Propuesta 2. Objetivos establecidos y conclusiones obtenidas.....	30
Apartado 4. Procedimiento teórico analítico a seguir para dimensionar la instalación fotovoltaica. Condiciones a cumplir. ....	32
4.1 Cálculos de los parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico bajo condiciones reales de trabajo. ....	33
4.2 Conexión entre campo FV e inversor solar. Condiciones a cumplir en tensión y corriente [31]. ....	35
4.3 Conformación del array o campo FV. Distribución de módulos. Asociación con el inversor seleccionado. Análisis a realizar y condiciones a cumplir [32].....	38

Apartado 5. Presentación de las propuestas de instalación de autoconsumo. Resultados analíticos asociados y resultados obtenidos en AutoCAD y PVSyst. Análisis económico y análisis de viabilidad..... 39

5.1 Propuesta 1 de instalación. Cálculos asociados a la conformación del array FV y conexión con el inversor de red. Resultados obtenidos. Análisis económico. Estudio de viabilidad..... 40

5.1.1 Procedimiento teórico y analítico seguido, para conformar el array FV y su conexión con el inversor de red..... 40

5.1.2 Disposición del array FV sobre la superficie útil..... 41

5.1.3 Análisis del balance energético y económico de la instalación a partir de PVSyst.... 42

5.1.4 Conclusiones obtenidas. Análisis de viabilidad..... 44

5.2 Propuesta 2 de instalación. Cálculos asociados a la conformación del array FV y conexión con el inversor de red. Resultados obtenidos. Análisis económico. Estudio de viabilidad..... 44

5.2.1 Procedimiento teórico y analítico seguido, para conformar el array FV y su conexión con el inversor de red..... 45

5.2.2 Disposición del array FV sobre la superficie útil..... 45

5.2.3 Análisis del balance energético y económico de la instalación a partir de PVSyst.... 45

5.2.4 Conclusiones obtenidas. Análisis de viabilidad..... 47

## **CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURO .....48**

Apartado 1. Conclusiones..... 48

Apartado 2. Líneas de trabajo futuro..... 50

## **REFERENCIAS.....51**

### **ANEXOS TEXTUALES.**

**ANEXOS. .... 1**

Anexo I: Historia de la energía solar fotovoltaica. Ámbitos de aplicación. Ventajas y Desventajas. Situación actual en España y en el mundo. .... 1

Anexo II: Instalación de autoconsumo fotovoltaico. Tipología y componentes principales. Teoría básica asociada. .... 11

Anexo III: Legislación vigente en España. Tipologías de instalación y modalidades de autoconsumo. Procedimiento administrativo a seguir. Normativas reguladoras a aplicar. .... 56

Anexo IV: Solimetría. Estudio de la energía solar. Formas de cuantificarla y aprovecharla. Teoría fundamental asociada. Análisis del recurso solar disponible y aprovechable por la industria objeto de estudio. .... 85

Anexo V: Instrumentación de medida utilizada y elementos auxiliares. Configuración de la instrumentación. Mediciones realizadas. Cálculos asociados a estas mediciones. Análisis de los consumos totales reales de la industria y análisis de su factura eléctrica. ....	97
Anexo VI: Procedimiento teórico y analítico a seguir para realizar el dimensionado de la instalación fotovoltaica. Dimensionado del campo fotovoltaico y conexión con el inversor de red. ....	138
Anexo VII: Software utilizado. Información asociada. ....	150
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>156</b>

## ANEXOS DIGITALES.

Anexo I: Hojas de características.

Anexo II: Archivos Excel.

Anexo III: Archivos AutoCAD.

Anexo IV: Archivos PVSyst.

Anexo V: Vídeos de la industria – Maquinaria.

---

## ÍNDICE DE TABLAS

---

<i>Tabla 1. Resultados cuantitativos asociados a la puesta en marcha de la galera. 3 arranques diferentes.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 2. Resultados cuantitativos asociados a la operación normal de la galera. 2 días seguidos medidos. ....</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 3. Balance económico de la instalación de autoconsumo asociada a la propuesta 1. Payback time. ....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 4. Balance económico de la instalación de autoconsumo asociada a la propuesta 2. Payback time. ....</i>	<i>47</i>

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

<i>Figura 1. Esquema básico de una instalación fotovoltaica [6].</i> .....	5
<i>Figura 2. Partes constituyentes de un panel fotovoltaico [15].</i> .....	7
<i>Figura 3. Simbología asociada a un inversor fotovoltaico [19].</i> .....	8
<i>Figura 4. Analizador de redes CIRCUTOR AR5 utilizado. ....</i>	13
<i>Figura 5. Galera. ....</i>	17
<i>Figura 6. Circuito de medición asociado a la galera. ....</i>	17
<i>Figura 7. El estudiante, al lado del circuito trifásico de suministro de la galera. ....</i>	17
<i>Figura 8. Curva de consumo asociada al arranque de la galera. 3 arranques diferentes. ....</i>	18
<i>Figura 9. Curva de consumo asociada a la operación normal de la galera. 2 días seguidos medidos. ....</i>	19
<i>Figura 10. Industria vista desde la entrada [26].</i> .....	21
<i>Figura 11. Industria vista desde arriba. Límites establecidos a partir de líneas rojas [26]. ....</i>	24
<i>Figura 12. Balance energético de la instalación de autoconsumo, asociado a la primera propuesta realizada. ....</i>	30
<i>Figura 13. Balance energético de la instalación de autoconsumo, asociado a la segunda propuesta realizada. ....</i>	32
<i>Figura 14. Condiciones de conexión, en términos de tensión, entre array fotovoltaico e inversor. ....</i>	36
<i>Figura 15. Planta de la cubierta. Disposición del array FV asociado a la propuesta de instalación 1, junto con las cotas asociadas. ....</i>	41



## INTRODUCCIÓN

### *Apartado 1. Motivación.*

En este apartado se describen las razones que motivan la realización de este Trabajo Fin de Grado (TFG).

La energía solar fotovoltaica goza de un momento de pleno desarrollo a nivel mundial y nacional, tanto tecnológico como de implementación, con grandes previsiones de crecimiento de cara a futuro. Esto se debe principalmente a dos razones fundamentales:

- Se pretende aprovechar la mayor cantidad de energía proveniente del sol, que es una fuente de energía renovable, rica y constante.
- Se pretende sustituir, siguiendo el marco de objetivos establecidos por la agenda 2030 de la ONU [1], toda aquella fuente de energía cuya explotación genere contaminantes que sean dañinos para el medio ambiente.

Por ello, el gobierno Español, en conjunto con los países de la Unión Europea, está permitiendo y facilitando la introducción y puesta en marcha de estos sistemas de aprovechamiento de la energía, debido a las grandes prestaciones que otorgan, resaltando el gran ahorro económico, además de que ayudan a realizar la transición para que el consumo energético sea en su totalidad de origen renovable (desarrollo sostenible medio-ambiental), evitando así la emisión de contaminantes a la atmósfera derivados de los procesos de producción de energía eléctrica y, finalmente, evitando las consecuencias (ya conocidas) perjudiciales para el medio ambiente y, en definitiva, para el ser humano.

Entonces, ante la situación actual legislativa que se da en España, considerando además la gran cantidad de energía solar que llega a la superficie terrestre durante gran parte del año y que se puede aprovechar, se hace inconcebible no sacar partido a la situación.

Además, la teórica y mecánica asociada a dicha energía y a las instalaciones de autoconsumo relacionadas no son especialmente complejas, por lo que esto da lugar a querer entender, diseñar e implementar(las) allá dónde se pueda.

En definitiva, promocionar el desarrollo e instalación de la energía solar fotovoltaica beneficia al medio ambiente, además de dar un beneficio directo al usuario consumidor.

Tenemos una gran oportunidad en nuestro país que NO podemos desaprovechar.

## Apartado 2. Objetivos.

Los objetivos fundamentales de este trabajo son:

- Conocer profundamente toda la teoría y la práctica asociada a la energía solar fotovoltaica, y las formas de aprovecharla al máximo (optimizando dicho aprovechamiento), en este caso, a partir de instalaciones de autoconsumo fotovoltaico.
- Aprender a utilizar un instrumento de medida profesional y necesario en el ámbito industrial, como es el analizador de redes, de forma que capacite para obtener información real y precisa sobre la energía eléctrica consumida por la industria, en términos de cantidad y calidad, para después utilizar estos datos a la hora de diseñar la instalación de autoconsumo y que los resultados obtenidos sean lo más realistas y óptimos posibles, adecuados a su situación.
- Aprender a diseñar plenamente y correctamente una instalación de autoconsumo fotovoltaica, familiarizándose tanto con la metodología asociada a la realización de un proyecto de este tipo, como con todos los conocimientos y conceptos que requieren conocerse asociados a la fotovoltaica (solimetría, electricidad, legislación, etc.). A su vez, se pretende aprovechar la oportunidad que actualmente se da en España, donde ya se está empezando a desarrollar profesionalmente a gran escala proyectos de fotovoltaica, debido a la posición más abierta y permisible de la legislación española.

También se pretende analizar la viabilidad económica de estas instalaciones a día de hoy, y cómo se pueden aprovechar las prestaciones dadas por las mismas para generar una reducción significativa en el coste de la energía eléctrica consumida de la red, plasmado en la factura eléctrica a final de mes.

## Apartado 3. Introducción a la energía solar fotovoltaica. Ámbitos de aplicación, ventajas y desventajas.

*\* En los apartados 1, 2 y 3, del anexo textual I, se detalla toda la información relacionada con la historia de la energía solar fotovoltaica, hasta la actualidad.*

A modo de introducción, la palabra “fotovoltaico” proviene del griego, donde “phos” (foto) significa <<luz>> y la terminación -voltaico se asocia directamente al reconocido físico italiano Alejandro Volta [2].

La energía solar fotovoltaica es aquella que resulta de convertir la radiación solar (energía emitida por el Sol, en forma de ondas electromagnéticas) en energía eléctrica. Esta transformación de energía se lleva a cabo a partir del elemento básico conformante de una instalación fotovoltaica, la célula fotoeléctrica.

Estas células pueden estar constituidas por materiales semiconductores, diseñados con unas características adecuadas, o por un sistema compuesto por la deposición de determinados metales sobre un sustrato (celda fotovoltaica de película delgada).

El principio de funcionamiento de la célula fotovoltaica, centrándose en aquellas constituidas por la unión de materiales semiconductores, se detalla en el apartado 2.4 del anexo textual II.

A día de hoy, las células comerciales consiguen alcanzar rendimientos de alrededor del 30%, aquellas que se han constituido a partir de las tecnologías más avanzadas.

Las células solares son capaces de funcionar a pleno rendimiento durante aproximadamente 25 años, siendo ésta la vida útil de las mismas. Tras ese tiempo, las prestaciones de éstas disminuyen por debajo de un valor mínimo útil [3].

### 3.1 Ámbitos de aplicación [4].

*\* Los ámbitos de aplicación de la energía solar fotovoltaica se describen con detalle en el apartado 4 del anexo textual I.*

Como ámbitos fundamentales en los que el uso de la energía fotovoltaica ha sido de gran utilidad, demostrando gran desempeño a la hora de suministrar energía eléctrica a los sistemas asociados, están:

- Telecomunicaciones y señalización.
- Ámbito doméstico rural.
- Ámbito agrícola y ganadero.
- Transporte y navegación marítima.
- Integración en edificios o estructuras aisladas, sin conexión a red.
- Integración en edificios o estructuras con conexión a red.
- Dispositivos flotantes sobre medio acuático.

### 3.2 Ventajas y Desventajas de la energía solar fotovoltaica.

*\* Las ventajas y desventajas asociadas a la energía solar fotovoltaica se describen con detalle en el apartado 5 del anexo textual I.*

El aprovechamiento de esta energía tiene muchas ventajas, aunque también posee desventajas.

A continuación, se mencionan las ventajas más importantes asociadas:

- Reducción de la factura eléctrica.
- Poco contaminante.
- Precio de la instalación y mantenimiento reducido.
- Fabricación sostenible.
- Paneles reciclables y larga vida útil de la instalación.

- Posibilita la electrificación en lugares aislados de la red eléctrica.

Continuando con las desventajas de la energía solar fotovoltaica, cabe destacar:

- Es una fuente de energía muy variable y dependiente del entorno.
- Limitaciones geométricas y de eficiencia.
- Dependencia de la red eléctrica.

#### *Apartado 4. Energía solar fotovoltaica. Tipos de instalación. Componentes fundamentales y tecnologías asociadas.*

En primer lugar, se ve oportuno definir qué es una instalación de autoconsumo fotovoltaica: es una instalación que permite producir energía eléctrica a partir de la energía solar proveniente del sol, y consumirla en un punto suficientemente cercano al de producción, independientemente de que exista posibilidad de conexión a la red eléctrica o a otro tipo de instalación suministradora de electricidad regulada.

##### 4.1 Tipos de instalaciones fotovoltaicas [5].

*\* Los tipos de instalaciones fotovoltaicas se describen con detalle en el apartado 1 del anexo textual II.*

Existen diferentes tipos de instalación fotovoltaica:

- En función de su tamaño, existen instalaciones de pequeña (una vivienda), mediana (una industria) y gran escala o *utility-scale* (plantas fotovoltaicas con grandes potencias instaladas, por ejemplo, 1MW).

En nuestro caso, las instalaciones propuestas se considerarán de mediana escala, ya que se asociará a una industria.

- En función de su posibilidad de conexión a la red eléctrica, existen instalaciones conectadas a la red eléctrica o aisladas.

En nuestro caso, las instalaciones propuestas estarán conectadas a la red eléctrica.

- En función de si disponen de sistemas de almacenamiento de la energía producida, existen instalaciones con baterías (sistema de almacenamiento) o sin baterías.

En nuestro caso, las instalaciones propuestas no poseerán sistemas de almacenamiento.

- En función de si la instalación produce más energía de la que el consumidor demanda, existen instalaciones con excedentes o sin excedentes.

En nuestro caso, las instalaciones propuestas sí poseerán excedentes energéticos.

## 4.2 Componentes fundamentales de una instalación fotovoltaica y tecnologías asociadas.

Por otro lado, la instalación de autoconsumo se conforma de diferentes elementos que están interconectados, con el objetivo de hacer llegar al consumidor, en la forma y calidad que este la requiera, la máxima cantidad de energía generada a partir de la radiación solar incidente. Un ejemplo de esquema básico asociado a una instalación de autoconsumo, con sistema de almacenamiento por baterías, y conectada a la red eléctrica, es el de la Figura 1.

Los elementos fundamentales que la conforman, son: las células fotovoltaicas, que forman los paneles fotovoltaicos, estructuras asociadas a los paneles, el inversor, el controlador de carga o inversor-cargador, las baterías, la infraestructura eléctrica que permite transportar la energía desde el punto de generación hasta el punto de consumo con seguridad y calidad (cableado, cuadros eléctricos, protecciones, sistemas de mando, sistemas de medición, etc.).

También son elementos de la instalación aquellas estructuras auxiliares que los paneles fotovoltaicos requieran, en caso de necesitar tener una inclinación dada o estar en altura, por ejemplo.

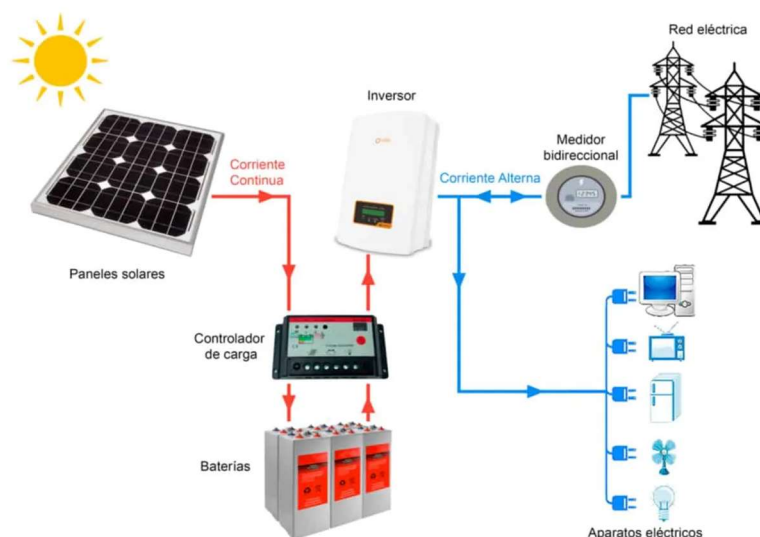


Figura 1. Esquema básico de una instalación fotovoltaica [6].

## 4.3 Célula fotoeléctrica. Información básica y tipología de células existentes en la actualidad.

*\* Información auxiliar necesaria a conocer, asociada a la célula fotoeléctrica, se describe con detalle en el apartado 2 del anexo textual II.*

Comenzaremos por explicar la unidad básica fundamental del sistema: la célula fotoeléctrica.

La célula fotovoltaica, también denominada célula solar, célula fotoeléctrica, celda solar o fotocélula, se encarga de transformar la energía solar en energía eléctrica aprovechando el efecto fotoeléctrico [3]. Está compuesta por materiales semiconductores extrínsecos [7].

Como materiales semiconductores más comúnmente usados en la actualidad, están el silicio (Si), el arseniuro de galio (GaAs) y el telururo de cadmio (CdTe) (célula de película delgada), aunque se continúa investigando con diferentes materiales semiconductores, buscando obtener la mayor eficiencia posible [3,8]. Más concretamente, el silicio ha sido el más utilizado en las últimas décadas, debido a los “correctos” valores de eficiencia proporcionados y a los bajos costes asociados, al ser el silicio el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre [9]. Sin embargo, estudios recientes han revelado que se pueden obtener mayores eficiencias de conversión a partir del arseniuro de galio, siendo este último material más caro debido a su mayor escasez como recurso natural.

El proceso de fabricación de células fotoeléctricas más utilizado es el proceso Czochralski [3,10].

#### 4.3.1 Tipología de células en función de la cristalización del silicio.

Existen diferentes tipologías de células en función de la forma en la que se produce el silicio de grado semiconductor. Las más relevantes a día de hoy, son [3,11,12]:

- Célula de silicio monocristalino.
- Célula de silicio policristalino.
- Célula de silicio amorfo.
- Células multiunión.
- Células de capa delgada.

#### 4.4 Paneles fotovoltaicos. Partes constituyentes y formas de disposición. Tecnologías más innovadoras utilizadas en la actualidad.

*\* Información auxiliar necesaria a conocer, asociada al panel fotovoltaico, se describe con detalle en el apartado 3 del anexo textual II.*

El panel fotovoltaico, también denominado módulo fotovoltaico, es un elemento fundamental de la instalación, y es el que se encarga de proporcionar a las células fotoeléctricas la mayor cantidad de radiación solar posible, y con la mejor calidad, de forma que estas puedan convertir dicha radiación incidente, sobre su superficie útil, en energía eléctrica.

Este está formado por un conjunto determinado de células fotovoltaicas iguales.

Para constituir el panel, en primer lugar se conectan las células en serie, hasta conseguir el voltaje deseado (voltajes en serie se suman) y, posteriormente, se conectan entre sí varias asociaciones serie de células, hasta conseguir la corriente deseada (corrientes en paralelo con mismo sentido, que convergen en un mismo punto, se suman) [13].

#### 4.4.1 Partes constituyentes del panel fotovoltaico [13–15].

Diferentes elementos constituyen la estructura convencional del panel fotovoltaico. Estos se encargan de: crear la protección adecuada del conjunto de células fotovoltaicas frente a los agentes externos, dotar de rigidez al panel (permitiendo la sujeción del mismo a la estructura que lo soporte), permitir la conexión eléctrica del mismo con otros elementos de la instalación, y capacitar al panel para generar energía eléctrica con la mayor eficiencia posible. Dichos elementos son:

- Marco metálico.
- Vidrio templado.
- Encapsulado.
- Células solares.
- Capa opaca.
- Junta de conexión.

La Figura 2 muestra cada una de las partes constituyentes del panel, junto con su orden de conformación.



Figura 2. Partes constituyentes de un panel fotovoltaico [15].

#### 4.4.2 Formas de disposición de los paneles. Constitución del campo fotovoltaico [16].

Los diferentes tipos de uniones entre módulos fotovoltaicos son:

- String fotovoltaico.
- Array fotovoltaico.

#### 4.4.3 Tecnologías más innovadoras presentes en los paneles [15].

Cabe mencionar que, actualmente, existen tecnologías en desarrollo, asociadas a los paneles fotovoltaicos, que mejoran el rendimiento del mismo. Entre las más importantes y utilizadas en la actualidad, se destacan tres:

- Tecnología PERC.
- Tecnología bifacial.
- Tecnología de célula partida o half-cell.

#### 4.5 Inversor solar. Tipología de inversores y características asociadas.

*\* Información auxiliar necesaria a conocer, asociada al inversor solar, se describe con detalle en el apartado 4 del anexo textual II.*

El inversor solar es otro dispositivo fundamental en la instalación fotovoltaica, y su función principal es la de convertir la energía eléctrica de corriente continua (CC), entregada por los módulos fotovoltaicos o por el sistema de acumulación (baterías) (en caso de que el inversor funcione como regulador de carga, inversor-cargador), en energía eléctrica de corriente alterna (CA), que será la que se entregue al consumidor y, cuando corresponda, a la red eléctrica.

Una de las funciones que el inversor desarrolla, y que es de gran relevancia, es la de forzar al panel fotovoltaico a trabajar en su punto de máxima potencia (PMP), maximizando así la producción del mismo y añadiendo eficiencia al sistema. También se encarga de monitorizar el funcionamiento de la instalación, sincronizar la instalación fotovoltaica con la red eléctrica y proteger al campo fotovoltaico de sobretensiones o cortocircuitos en el lado de la red eléctrica, y la red de sobretensiones y cortocircuitos en el lado del campo fotovoltaico [17].

Este elemento desarrolla un rendimiento muy elevado, lo que contribuye a la optimización del proceso de transformación de la energía, aunque se puede ver mermado por la influencia de la temperatura y de la altitud [18].

El símbolo de un inversor fotovoltaico se puede observar a partir de la Figura 3.

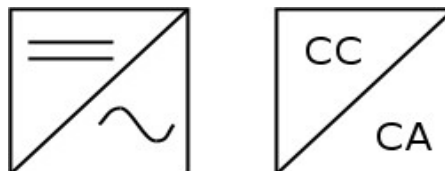


Figura 3. Simbología asociada a un inversor fotovoltaico [19].

##### 4.5.1 Tipología de inversores. Información básica fundamental.

Existirán diferentes tipos de inversores en función de la naturaleza de la alimentación eléctrica de la instalación, si es monofásica (vivienda, normalmente) o trifásica (industria y *utility scale*),

en función de la disposición de los módulos que se van a conectar a las entradas del inversor, y en función de su posibilidad de conexión a la red eléctrica [20].

En función de la naturaleza de la alimentación de la instalación, existen [20]:

- Inversores monofásicos. Transforman la potencia suministrada por el campo fotovoltaico a valores típicamente monofásicos: 230V CA en España. Son utilizados comúnmente en instalaciones monofásicas como son, por ejemplo, hogares unifamiliares de potencia demandada entre 3kW y 10kW. A la salida poseen fase y neutro.
- Inversores trifásicos. Transforman la potencia suministrada por el campo fotovoltaico a valores típicamente trifásicos: 230V CA entre fase y neutro (tensión de fase,  $V_F$ ), y 400V CA entre fase y fase (tensión de línea,  $V_L$ ). Son utilizados comúnmente en industrias y en sistemas de producción utility scale. A la salida poseen 3 fases, neutro, y conexión a tierra.

Es importante que cada una de las fases del inversor esté equilibrada con respecto a las demás (entregue la misma potencia con la misma calidad).

Para el estudio realizado en este trabajo, se utilizará esta tipología de inversor, ya que la industria está alimentada a partir de un sistema de corriente alterna trifásica.

En función de con qué tipo de disposición de módulos va a trabajar el inversor, existen [20]:

- Inversor módulo. Son los inversores a los que a su entrada se conecta la salida de un único módulo fotovoltaico.
- Inversor string. Son los inversores a los que a su entrada se conecta la salida de un string fotovoltaico.
- Inversor multistring. Son los inversores a los que a sus diferentes entradas se conecta la salida de los diferentes strings fotovoltaicos.
- Inversor central. Son los inversores a los que a su entrada se conecta la salida de un array fotovoltaico.

En función de si el sistema de autoconsumo fotovoltaico va a estar conecta a la red eléctrica o no, existen [21,22]:

- Inversores conectados a la red eléctrica.
- Inversores aislados de la red eléctrica.

Los inversores deberán estar equipado con sistemas de seguridad ante sobretensiones, sobrecargas y cortocircuitos, además de poseer aislamiento galvánico (aislamiento del circuito asociado al inversor respecto del circuito demandador de carga), entre otros dispositivos de seguridad asociados [23].

#### 4.6 Regulador de carga y sistemas de almacenamiento: baterías.

*\* Información auxiliar a conocer, asociada al regulador de carga, se describe con detalle en el apartado 5 del anexo textual II.*

*\* Información auxiliar a conocer asociada a sistemas de almacenamiento, se describe con detalle en el apartado 6 del anexo textual II.*

El regulador de carga y las baterías son otros dos elementos de la instalación, fundamentales ante el caso de imposibilidad de conexión a la red eléctrica, o ante el caso de acogernos a la modalidad de instalación de autoconsumo SIN excedentes.

Estos se utilizan en toda instalación que posea sistema de almacenamiento por baterías. En aquellos que no posean sistema de almacenamiento, no será necesario instalar un regulador de carga.

En las casuísticas que se van a estudiar en este trabajo, ninguna va a contemplar el uso de regulador de carga y baterías, por lo que la teoría asociada se presenta detalladamente en anexos mencionados, y no en la memoria.

#### 4.7 Infraestructura eléctrica [24,25].

*\* Información auxiliar a conocer, asociada a la infraestructura eléctrica, se describe con detalle en el apartado 7 del anexo textual II.*

*\* Información auxiliar a conocer, asociada a las normativas eléctricas reguladoras que se deben cumplir a la hora de planificar y dimensionar la infraestructura eléctrica asociada a la instalación de autoconsumo, se detalla en el apartado 6 del anexo textual III.*

La infraestructura eléctrica será, por definición, el conjunto de dispositivos de maniobra, control, regulación, protección y medida, incluyendo los accesorios asociados a las canalizaciones eléctricas, que van a ser utilizados para la construcción de la instalación fotovoltaica de autoconsumo y que van a conformar parte de la misma.

La infraestructura eléctrica incluye fundamentalmente:

- Cableado y conectores.
- Cuadros de conexión o *combiner box*.
- Aparamenta: Dispositivos de maniobra y protección.
- Aparamenta: Dispositivos de medida.

## *Apartado 5. Legislación vigente asociada a las instalaciones de autoconsumo fotovoltaicas en España. Configuración asociada a las propuestas de instalación planteadas. Objetivos y viabilidad.*

*\* Toda la información auxiliar necesaria a conocer, asociada a legislación, se describe con detalle en el anexo textual III.*

### 5.1 Legislación actual aplicable en España. Ámbito de aplicación.

A día de hoy, la normativa que está en vigor en España, directamente asociada a la energía fotovoltaica y sus formas de aprovechamiento, es el Real Decreto (RD) 244/2019, de 5 de abril, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica.

Este Real Decreto busca regular las modalidades de autoconsumo de energía eléctrica definidas en el artículo 9 de la Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico, añadiendo nueva normativa que se adecua a los tiempos actuales, además de otorgar mayor libertad, oportunidades y facilidad, a aquellas personas que deseen aprovechar y beneficiarse de la energía fotovoltaica.

### 5.2 Configuración legislativa asociada a las propuestas de instalación planteadas y estudiadas.

Las propuestas de instalación de autoconsumo fotovoltaico que se presentan y analizan en el apartado 5 de la sección de desarrollo, poseen las siguientes características, en términos legislativos:

- Conexión de la instalación en baja tensión, a través de red interior.
- Instalación asociada a la modalidad de instalación de autoconsumo con excedentes acogida a compensación.

El objetivo de establecer esta configuración legislativa es que, según las demandas del cliente expresadas en el apartado 2.1.3 de la sección de desarrollo de este trabajo, se quiere proporcionar a la industria la energía demandada, a partir de la producción fotovoltaica, de forma que se ahorre la máxima cuantía económica posible en la factura de la luz a final de mes.

Esta configuración es la más adecuada, ya que permite generar unos ingresos a la hora de verter a red la energía fotovoltaica que la industria no esté consumiendo. Se podría haber optado por la modalidad de autoconsumo con excedentes no acogida a compensación, pero los trámites administrativos son mayores y no se asegura obtener un precio de compra de la energía de vertido a red mucho mayor al que se pueda pactar con la comercializadora.

El procedimiento administrativo que el propietario de la industria deberá seguir para conformar su instalación de autoconsumo fotovoltaica conforme a la legislación, y acogiéndose a la modalidad mencionada, se detalla en el apartado 7.3 del anexo textual III.

En los apartados 7.3 y 7.5 del anexo textual III, se realiza el estudio de viabilidad relacionado.

## DESARROLLO

*\* La información asociada al software utilizado y mencionado en este apartado de la memoria, se detalla en el apartado 1 del anexo textual VII.*

### *Apartado 1. Analizador de redes. Descripción, objetivos y elementos utilizados. Configuración establecida y resultados obtenidos.*

*\* En los apartados 1, 2 y 3 del anexo textual V, se presenta información relevante asociada al analizador de redes, elementos auxiliares utilizados y configuración asociada, que no es citada en este apartado por falta de espacio y que es necesario conocer para entender lo expuesto en este apartado.*

*A su vez, en este anexo, se presenta más trabajo realizado a partir de estos elementos, incluyendo usos, resultados y análisis de resultados, que no es citado en este apartado.*

*\* En el anexo digital I, se presenta la hoja de características del analizador de redes AR5, de Circutor, utilizada. Se asocia el siguiente nombre al archivo: "Analizador de redes AR5 CIRCUTOR".*

*Para obtener la información técnica asociada al analizador de redes, que se cita en este apartado, se ha tomado como referencia esta hoja.*

Uno de los objetivos que se habían propuesto, en este trabajo, era el de recabar datos exactos, mediante el uso de un instrumento de medida profesional y preciso, de la demanda energética asociada a la industria objeto de estudio. De esta forma, se tiene una referencia de la cantidad de energía que es consumida por la misma. Así, se puede conocer, de forma correcta y precisa, el dimensionamiento de potencia que se debe dar a la instalación fotovoltaica de autoconsumo. Esto permite satisfacer parte o la totalidad de la demanda energética medida, según los deseos del cliente y las posibilidades que la industria proporcione, maximizando el aprovechamiento energético.

El instrumento de medida utilizado ha sido un analizador de redes CIRCUTOR AR5 (Figura 4). Este, junto con los elementos auxiliares utilizados, para la correcta toma de medidas, han sido proporcionados por el director de este trabajo, y pertenecen a la Universidad de Zaragoza.

El datasheet seguido y utilizado para su correcta configuración fue publicado por primera vez en enero del 2004 por Circutor. Por lo tanto, se deduce que esta marca o modelo de analizador de red tiene, al menos, 16 años. Se desconoce la fecha exacta en la que este fue adquirido, pero sí se observa que este analizador no posee las mismas opciones de configuración que las que poseen analizadores más nuevos y actualizados. Sin embargo, cabe resaltar que esto no ha llegado a ser un impedimento suficiente como para no permitir la correcta adquisición de datos y posterior análisis e interpretación de los mismos, aunque sí se reconoce que ha dificultado la labor.

*\* En el apartado 6 del anexo textual V se comentan los principales problemas que se han enfrentado, para alcanzar los objetivos propuestos, que a continuación se describen.*



Figura 4. Analizador de redes CIRCUTOR AR5 utilizado.

En la industria, existen diferentes formas de obtener los datos asociados a consumos energéticos, en función del lugar de la instalación en la que se realicen las medidas.

La intención inicial era una toma de medidas general, asociadas al consumo total de la fábrica, relacionado con maquinaria, pero también con otros dispositivos cuyo funcionamiento es esencial y que demandan energía eléctrica (sistema de compresores, por ejemplo). Esta toma de medidas se podía realizar en el embarrado del cuadro eléctrico general, o en el embarrado del ICP. Debido a cómo estaba dispuesto el cableado trifásico en el cuadro eléctrico general, que imposibilitaba la toma de medidas, se decidió intentar realizar esta toma de medidas en el embarrado del ICP. Finalmente, debido a percances originados en el intento, se realizó la toma de medidas en los subcuadros eléctricos a los que estaban conectados las máquinas más importantes y que más consumían.

Se hubiera deseado realizar la toma de medidas como en un primer momento se había ideado, ya que de esa forma se podía conocer, de forma completa y exacta, el consumo de la industria.

Sin embargo, finalmente se pudo tomar medidas de 3 máquinas diferentes. Estas son las más utilizadas en el ámbito laboral diario y que más consumen.

### 1.1 Instrumentos auxiliares utilizados. Función y configuración asociadas.

*\* Información auxiliar necesaria a conocer, asociada a los elementos auxiliares utilizados y su configuración asociada, se describe con detalle en los apartados 1 y 2 del anexo textual V.*

Una vez citados y descritos los objetivos, se procede a mencionar y describir generalmente la instrumentación de la que se ha dispuesto y que se ha utilizado.

- Fuente de alimentación y cableado asociado (Circutor). Estos instrumentos se han utilizado para proporcionar energía a la batería del analizador de redes, y para transferir la información almacenada en este al ordenador. La fuente se alimenta a 230V en CA.
- Cable de conexión AUX (Circutor). Este cable conecta el analizador de redes con la fuente de alimentación, y sirve para transferir datos y para cargar la batería del analizador.
- Cable de comunicación de datos RS-232 y cable adaptador RS-232 a USB DB9 Serial asociado. Estos dispositivos se han utilizado para transferir datos del analizador de redes al ordenador.

Estos elementos se conectaron entre sí para poder obtener la funcionalidad mencionada.

- Cableado para medir voltaje (CAT III). Se disponía de hasta 4 cables de este tipo. En la industria, se requería medir voltaje en corriente alterna y asociados a sistema trifásico.
- Pinzas amperimétricas para medir corriente. Se disponía de un total de 5 pinzas.

La salida de estos últimos dispositivos se conecta en la parte trasera del analizador de redes, y su forma de conexión al analizador dependerá del tipo de medición que vayamos a realizar, sobre el tipo de sistema eléctrico que estemos midiendo. Información relacionada se encuentra en los apartados 2 y 3, del anexo textual V.

A lo largo del proceso, para poder tomar medidas reales y veraces, primero se tuvo que entender cómo funcionaba el analizador de redes y cuál era su configuración adecuada para cada caso. Para ello, se acudió al *datasheet* del fabricante, dónde se describía todas las configuraciones posibles del analizador. Posteriormente, en función del tipo de medida que se quería realizar, se configuraba el instrumento y se conectaban los dispositivos de medición de forma correspondiente.

## 1.2 Mediciones reales realizadas en la industria.

*\* En total, se han realizado mediciones sobre tres máquinas diferentes de la industria. A continuación, se presenta y analiza el procedimiento seguido y los resultados obtenidos para una de las máquinas medidas. Lo correspondiente para las máquinas restantes, se presenta en el apartado 7 del anexo textual V.*

*\* Los resultados mostrados en figuras y tablas se han obtenido a partir del software PowerVision Plus. La información del software utilizado se detalla en el apartado 1 del anexo textual VII.*

*\* Estas no han sido las únicas mediciones realizadas con el analizador de redes. La información asociada a estas otras mediciones no citadas en este apartado, se presentan en el apartado 4 del anexo textual V.*

Tras realizar las mediciones anteriormente mencionadas, y otras no mencionadas, se adquirió el conocimiento suficiente como para estar seguros de que, a la hora de ir a tomar medidas reales a la industria, se iba a ser capaz de tomarlas en la cantidad y forma esperada y requerida.

Al final, la toma de medidas se orientó a conocer el consumo de la maquinaria más utilizada y que más consume en la industria, la maquinaria más importante. Con estos datos, se suponía que se tenía la información más relevante asociada al consumo energético de la industria, aunque, por razones obvias, es una información insuficiente e inexacta, si queremos conocer el consumo total de la industria, que es lo que interesa en este caso, para poder posteriormente realizar el dimensionamiento de la instalación de autoconsumo fotovoltaica en base a ello.

A continuación, se describe la toma de medidas “profesionales” realizadas en la fábrica:

- Toma de medidas asociada a la máquina “Galera”.

La galera es una de las máquinas principales de la industria, que está funcionando constantemente, exceptuando momentos de descanso de los trabajadores.

*\* En el anexo digital V, en la carpeta “GALERA”, se encuentran vídeos en los que se muestra el funcionamiento de esta máquina y la labor desempeñada en la industria.*

El objetivo era el de obtener la curva de consumo asociada a esta máquina, para conocer qué cantidad de potencia producida por la instalación fotovoltaica iba a consumir, y dimensionarla previéndolo.

Para establecer el sistema de medición, se realizaron las conexiones de los instrumentos de medida de voltaje y corriente en el subcuadro eléctrico relacionado, siguiendo las configuraciones de medición asociadas a circuitos trifásicos, ya que esta máquina se alimenta de corriente alterna trifásica.

Se conectaron 3 pinzas de voltaje a las 3 fases de la alimentación, y las salidas se conectaron a las entradas del analizador correspondientes: VL1, VL2 y VL3.

En cuanto a las pinzas amperimétricas, se utilizaron 3 pinzas CPR-1000, al saber que, según datos proporcionados por el propietario de la fábrica, los consumos de corriente de la máquina llegaban a alcanzar los 100A en el arranque. Las pinzas se conectaron con la orientación adecuada, respetando el sentido de circulación de la corriente, y sus salidas se conectaron a las ranuras de entrada correspondientes del analizador: IL1, IL2 e IL3.

Los parámetros de medición más importantes del analizador se configuraron de la siguiente forma:

- En función del tipo de circuito eléctrico a medir: configuración trifásica.
- Relación de transformación de primario y secundario de corriente 1000:5.
- Parámetros eléctricos a medir: todos aquellos que el analizador permita, y mencionados anteriormente.

Sobre todo, interesaba medir potencia activa e inductiva consumida por cada una de las 3 fases (capacitivas no, porque no existirían en este caso, debido a la naturaleza de la maquinaria), y energía activa e inductiva total consumida. La potencia aparente consumida se calcularía, posteriormente, a partir de los datos de potencia activa e inductiva.

En total, se realizaron 2 mediciones diferentes asociadas a la misma máquina:

- 1 asociada a la puesta en marcha de la máquina. Esta medición se realizó con el objetivo de conocer cuánta potencia demandaba la máquina a la hora de arrancar, para después decidir de qué forma se iba a suministrar esta potencia consumida, si a través de la instalación fotovoltaica o a través de la red eléctrica.

Esta medición duró 30 minutos, aunque, como se observará a la hora de mostrar resultados, la máquina tarda en arrancar, aproximadamente, 2 minutos.

El periodo de recogida de datos que se configuró fue de 5 segundos, ya que se necesitaba resolución en el conjunto de datos medido. No se podía utilizar un periodo de 1 minuto si el arranque duraba 2 minutos. Sí se podría realizar de esta forma, pero los datos medidos carecerían de suficiente frecuencia de muestreo.

- 1 asociada a la curva de consumo de la máquina, en régimen permanente y operando normalmente. Este consumo se pretenderá satisfacer a partir de la potencia generada por la instalación de autoconsumo, aunque, dependiendo del caso de estudio, podrá también satisfacerse a través de la compra de energía a la red eléctrica.

La medición duró 2 días, ya que se pretendía medir la curva de consumo asociada a dos días diferentes, para tener mayor información.

El periodo de recogida de datos que se configuró fue de 5 minutos y medio (5:30 min). Posteriormente, tras analizar los datos obtenidos, se observó que no se llenaba la memoria de información, por lo que este valor se iría disminuyendo en mediciones posteriores.

A continuación, se muestran imágenes de la galera (Figura 5), del sistema de medición establecido (Figura 6) y del estudiante junto a dicho sistema de medición (Figura 7):



Figura 5. Galera.



Figura 6. Circuito de medición asociado a la galera.



Figura 7. El estudiante, al lado del circuito trifásico de suministro de la galera.

Los resultados que se obtuvieron tras esta toma de mediciones, se muestran a continuación:

- Toma de medidas asociada a la puesta en marcha de la máquina.

*\* A modo informativo:*

*Los datos que se muestran, a partir de gráficas (Figura 8) y tablas (Tabla 1), poseen una resolución de 1 minuto. Sin embargo, como se ha dicho, para esta medición se configuró una resolución de 5 segundos. Como se puede deducir, no se muestran todos los datos medidos realmente y poseídos.*

En la parte que posteriormente se redacta, asociada a análisis de resultado, se citan valores que se poseen, pero que no son presentados en las gráficas y tablas mostradas.

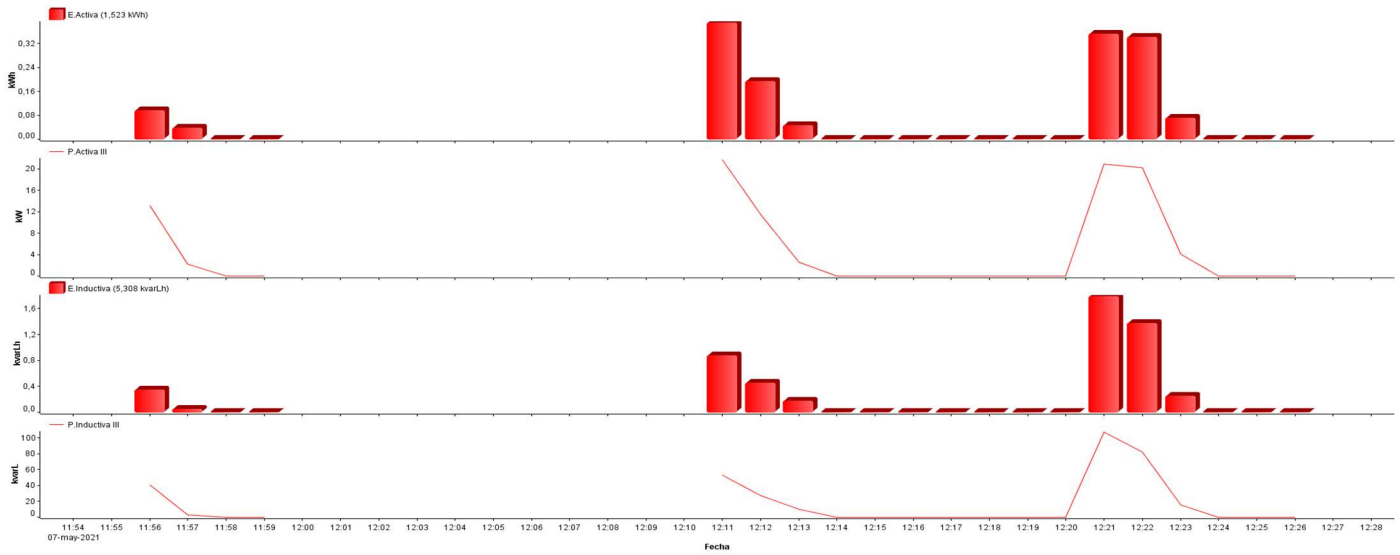


Figura 8. Curva de consumo asociada al arranque de la galería. 3 arranques diferentes.

Como se ha comentado anteriormente, las gráficas no se pueden mostrar con la calidad suficiente como para ser utilizadas como la única forma de presentación de los datos medidos. Por ello, se introduce también la tabla de valores asociada, dónde se incluyen valores medidos asociados a más parámetros de interés.

Hora	Tensión III (V)	Corriente L1 (A)	Corriente L2 (A)	Corriente L3 (A)	Potencia activa L1 (kW)	Potencia activa L2 (kW)	Potencia activa L3 (kW)	Potencia inductiva L1 (kvarL)	Potencia inductiva L2 (kvarL)	Potencia inductiva L3 (kvarL)	Energía activa (kWh)	Energía inductiva (kvarLh)	Factor de potencia
11:56:00	217	66,927	65,981	67,327	4,45	4,349	4,374	13,613	13,354	13,778	0,095	0,346	0,3
11:57:00	226,917	5,577	5,514	5,579	0,727	0,717	0,722	0,91	0,9	0,919	0,037	0,046	0,11
11:58:00	171,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11:59:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12:11:00	127	183,634	177,32	176,095	7,276	7,738	6,736	17,769	17,381	17,818	0,389	0,877	0,31
12:12:00	205,5	67,819	64,61	63,246	3,869	4,195	3,397	9,428	8,866	8,894	0,193	0,455	0,3
12:13:00	136,667	16,286	15,045	14,505	0,888	1,076	0,663	3,59	3,236	3,215	0,046	0,17	0,15
12:14:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12:15:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12:16:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12:17:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12:18:00	200,75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12:19:00	229,833	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12:20:00	229,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12:21:00	216,167	180,129	174,037	173,481	7,305	7,504	6,16	36,633	35,144	35,344	0,352	1,788	0,18
12:22:00	221,583	137,901	132,345	131,243	7,012	7,277	5,992	28,247	26,826	26,996	0,34	1,371	0,24
12:23:00	228,5	24,667	22,599	21,932	1,41	1,669	1,057	5,463	4,876	4,877	0,071	0,255	0,24
12:24:00	230	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12:25:00	230,083	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12:26:00	231	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 1. Resultados cuantitativos asociados a la puesta en marcha de la galería. 3 arranques diferentes.

Analizando los resultados, esta máquina consume grandes picos de corriente durante el periodo de arranque, a lo que se le asocia grandes consumos de potencia y energía. Ante este caso, se debe decidir si, a la hora de diseñar la instalación de autoconsumo fotovoltaico, se desea que esta potencia sea consumida de la red o deba ser suministrada por la instalación, lo que requerirá de un sobredimensionado de la misma.

Esta decisión se tomará posteriormente, a la hora de describir el dimensionamiento de cada caso de instalación de autoconsumo estudiado.

En términos cuantitativos, durante el 1er arranque serio de la máquina, dado a las 12:11h, esta llega a consumir una potencia activa total máxima de 39.434kW, una potencia inductiva total máxima de 56.204kvarL, y una potencia aparente total máxima de 67.154kVA. Durante el 2do arranque, dado a las 12:20h, consume una potencia activa total máxima de 32.759kW, una potencia inductiva total máxima de 111.095kvarL, y una potencia aparente total máxima de 113.047kVA.

**\* La potencia total máxima, ya sea activa, inductiva/capacitiva y/o aparente, es la calculada a partir de la suma de las potencias individuales consumidas por cada una de las fases.**

En términos de energía consumida, durante el 1er arranque, se consume una energía activa total igual a 0.518kWh y una energía inductiva total igual a 1.106kvarLh. Durante el 2do arranque, se consume una energía activa total igual a 0.67kWh y una energía inductiva total igual a 3.086kvarLh.

Como se puede observar, los valores varían de un caso a otro, lo que impide sacar conclusiones en este sentido. Estos se utilizan como referencia, pero no para realizar otros cálculos más precisos o sacar conclusiones serias asociadas.

- Toma de medidas asociada a la curva de consumo de la máquina.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos. A partir de la Figura 9 se puede observar la curva de consumo de la galera, mientras que a partir de la Tabla 2 se pueden observar los resultados cuantitativos medidos.

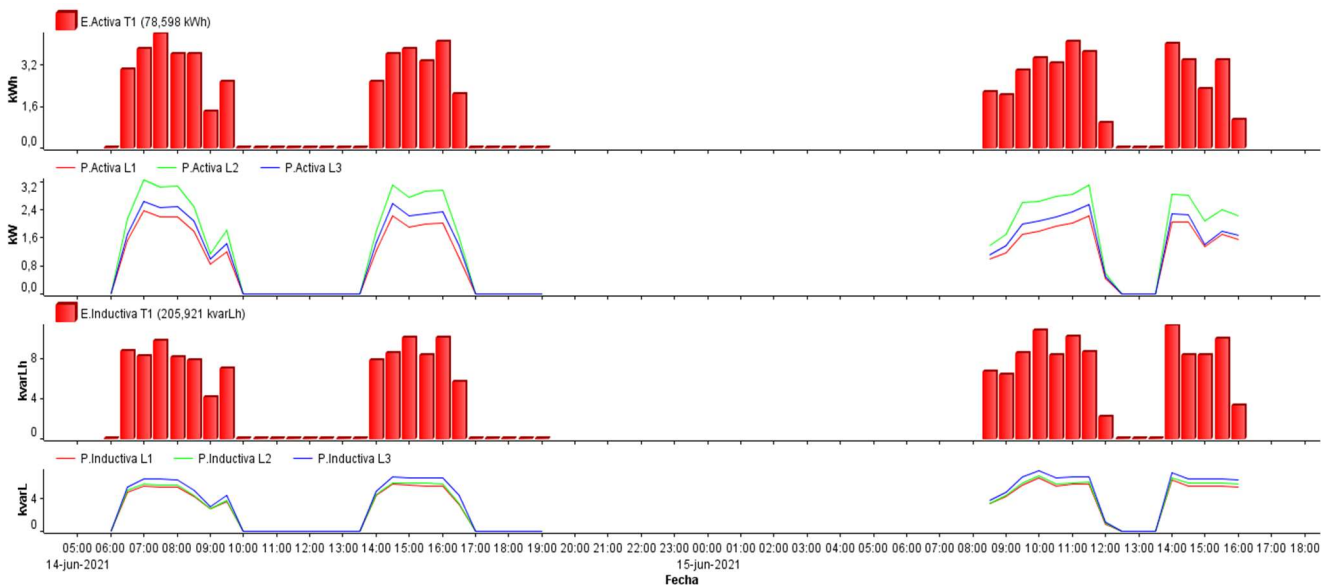


Figura 9. Curva de consumo asociada a la operación normal de la galera. 2 días seguidos medidos.

Fecha	Hora	Tensión III (V)	Corriente III (A)	Potencia activa L1 (kW)	Potencia activa L2 (kW)	Potencia activa L3 (kW)	Potencia inductiva L1 (kvarL)	Potencia inductiva L2 (kvarL)	Potencia inductiva L3 (kvarL)	Energía activa (KWh)	Energía inductiva (kvarLh)	Factor de potencia III
Lunes 14	6:00:00	96,7	15	0,907	1,282	1,015	2,872	2,996	3,28	3,02	8,715	0,14
	7:00:00	225,18	29	2,266	3,138	2,529	5,503	5,758	6,417	8,23	17,97	0,4
	8:00:00	225,36	26	1,978	2,755	2,266	4,806	4,992	5,622	7,245	15,785	0,36
	9:00:00	227,64	17	1,033	1,517	1,24	3,292	3,354	3,801	3,92	11,033	0,18
	10:00:00	232,36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	11:00:00	229,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	12:00:00	232,55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	13:00:00	233,09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	14:00:00	229,27	26	1,682	2,388	1,964	5,03	5,167	5,758	6,17	16,262	0,29
	15:00:00	226,55	29	1,938	2,827	2,242	5,631	5,87	6,553	7,155	18,361	0,35
	16:00:00	226,82	24	1,561	2,348	1,901	4,558	4,76	5,614	6,167	15,621	0,32
	17:00:00	231,45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	18:00:00	232,91	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19:00:00	233,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Martes 15	08:00:00	228,83	17	0,998	1,376	1,122	3,407	3,485	3,805	2,155	6,597	0,16
	09:00:00	228,3	25	1,445	2,161	1,679	4,987	5,201	5,73	5,015	14,804	0,25
	10:00:00	227,09	31	1,857	2,699	2,139	6,136	6,373	7,038	6,745	19,031	0,32
	11:00:00	227,82	30	2,122	2,955	2,441	5,767	5,966	6,648	7,771	18,678	0,37
	12:00:00	230,73	3	0,24	0,319	0,27	0,537	0,551	0,612	0,941	2,18	0,04
	13:00:00	232,18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	14:00:00	227	31	2,05	2,827	2,266	5,975	6,277	6,847	7,376	19,505	0,35
	15:00:00	226,18	28	1,538	2,26	1,614	5,543	5,918	6,402	5,637	18,129	0,29
	16:00:00	225	27	1,542	2,24	1,662	5,463	5,798	6,298	1,051	3,249	0,3

Tabla 2. Resultados cuantitativos asociados a la operación normal de la galera. 2 días seguidos medidos.

Analizando los resultados, uno de los aspectos más llamativos es el bajo valor del factor de potencia asociado a la máquina, lo que la hace poco eficiente en términos de aprovechamiento de la energía consumida, ya que gran parte se pierde consumida por el bobinado, en forma de energía inductiva. Esta energía no es aprovechable por la máquina, para efectuar el proceso de corte que tiene asignado.

Esto supone un problema, a la hora de que esta energía consumida sea suministrada por la instalación de autoconsumo fotovoltaico, ya que dicha energía producida se podría destinar a otros usos en los que sí se aprovechara correctamente.

La curva de consumo se puede apreciar perfectamente a partir de las gráficas. A lo largo del primer día (14 de junio), la máquina consume 41.907kWh de energía activa, y 103.747kvarLh de energía inductiva, sin consumir nada asociado a energía capacitiva, obviamente. A lo largo del segundo día (15 de junio), la máquina consume 36.691kWh de energía activa, y 102.173kvarLh de energía inductiva, sin consumir nada asociado a energía capacitiva.

En total, la energía activa consumida en 2 días es igual a 78.598kWh, mientras que la energía inductiva total consumida es igual a 205.921kvarLh.

En términos de consumo de potencia eléctrica, asociada a régimen permanente, esta máquina llega a consumir una potencia activa total máxima igual a 9.043kW, una potencia inductiva total máxima igual a 23.589kvarL, y una potencia aparente total máxima igual a 24.562kVA.

\* Para realizar el cálculo de potencia aparente se ha tenido como referencia el estudio realizado en el apartado 5 del anexo textual V.

## *Apartado 2. Estudio sobre la viabilidad de la instalación de un sistema de autoconsumo fotovoltaico en una industria real de Teruel. Características fundamentales de la industria. Demandas del cliente.*

### 2.1 Características generales y más relevantes de la industria. Aprovechamiento de sus recursos en relación al análisis a realizar. Demandas del cliente.

#### 2.1.1 Información básica de la industria objeto de estudio.

Se comienza con la descripción de la industria y de sus características generales.

La fábrica sobre la que se va a realizar el estudio es un aserradero que pertenece a la empresa MADERAS BIELSA S.C. Su propietario y gerente es Raúl Martín, el codirector de este trabajo de fin de grado. Esta está ubicada en la dirección: C. Londres, 14, 44195. Se encuentra instalada en el polígono La Paz de la ciudad de Teruel, Aragón, España.

A continuación, se presenta una imagen de la industria, vista desde la entrada (Figura 10). Esta se ha obtenido a través de Google Maps.



Figura 10. Industria vista desde la entrada [26].

La labor desarrollada en esta fábrica está directamente relacionada con el sector secundario de la industria, ya que se dedica a tratar la madera, acondicionándola en base a las demandas de sus clientes, para su posterior venta [27].

Concretamente, nos vamos a centrar en estudiar aquellas características de la fábrica que harían viable la realización de una instalación de autoconsumo que diera suministro eléctrico a la misma. En el apartado 1 del anexo textual VI, se presentan todas aquellas verificaciones o estudios de viabilidad a realizar previamente a efectuar cualquier cálculo.

### 2.1.2 Características más relevantes de la instalación.

Los datos técnicos y cualitativos más relevantes asociados a la industria, se presentan a continuación.

- Tipo de suministro eléctrico. La industria dispone de un sistema de suministro eléctrico trifásico de corriente alterna y recibe suministro como tal. Valores de tensión de fase y de línea son: 230V y 400V, respectivamente
- Latitud y longitud. Los valores de latitud y longitud de la cubierta siguen a continuación: 40.367463719872205, -1.1542768093482192, respectivamente.
- Orientación e inclinación de la cubierta. La cubierta de la industria posee una orientación de 50º este, con respecto al sur, y una inclinación de 18º.
- Superficie disponible y sombras. La mayor parte de la superficie disponible para realizar, sobre la misma, la instalación del campo fotovoltaico asociado a la instalación de autoconsumo, se encuentra en la cubierta de la industria.

La cubierta posee una superficie total de 1040 m<sup>2</sup>, asociándose 520 m<sup>2</sup> a cada vertiente. Sin embargo, a este valor de superficie se deberá restar posteriormente aquella que se destine a evitar el sombreado, y a habilitar canales de paso de seguridad para los operarios de mantenimiento o personal cualificado que lo requiera.

### 2.1.3 Demandas del propietario de la industria.

Conociendo las características fundamentales de la industria, y haciéndoselo conocer al propietario de la misma, él manifiesta que sus demandas en relación a la explotación de esta industria a partir de una instalación de autoconsumo fotovoltaico son:

- Aprovechamiento de toda superficie de cubierta que permita instalar sobre la misma el campo fotovoltaico de la instalación con la calidad y seguridad suficiente, teniendo en cuenta estudios mecánicos de resistencia de la estructura. A su vez, se busca que se pueda aprovechar el recurso solar existente de forma lo suficientemente óptima como para que sea rentable y meritorio usar la superficie para su explotación.
- Tiempo de recuperación de la inversión, o *payback time*, menor o igual a 5 años y que, a su vez, la vida útil de la instalación, y de los componentes utilizados, sea lo mayor posible. La calidad de los componentes deberá ser suficientemente alta para permitir alcanzar estos objetivos o demandas.
- Mayor reducción de la factura eléctrica posible, siempre y cuando se respete el *payback time* y las condiciones de calidad de los componentes.
- Optimizar la producción de energía eléctrica durante todo el año y no solo para unos determinados meses.

- Realizar una instalación optimizando el sistema para que permita aprovechar toda la energía producida, ya sea dando suministro a la demanda energética de la fábrica, o vertiendo a red, recibiendo una compensación económica por ello.
- No utilizar sistema de almacenamiento energético, al haber posibilidad de conexión a red eléctrica. Los resultados que otorgase no se espera que sean lo suficientemente meritorios como para asumir ese gasto.
- Dimensionar la instalación sin prever un aumento de la potencia contratada y consumida de cara a futuro.

Una vez conocidas las demandas del cliente, y las características fundamentales de la instalación, se procede a realizar un análisis de viabilidad asociado a las características de la industria, según demandas del propietario, y también asociado al recurso solar del que dispone.

También se estudiará la demanda energética de la industria, para poder realizar el dimensionado de los componentes de la instalación de forma correcta y óptima.

## 2.2 Estudio de viabilidad, asociado a las características y recursos aprovechables por la industria.

A continuación, se presenta el estudio de viabilidad asociado a la industria objeto de estudio:

- Tipo de suministro eléctrico. En relación al suministro eléctrico trifásico, se deberá elegir un inversor que, a su salida, pueda otorgar suministro trifásico. En la actualidad, esto no es un problema, ya que gran cantidad de inversores poseen esta característica, además de poder otorgar la potencia requerida.
- Orientación e inclinación de la cubierta.

En este caso, la orientación óptima sería que la cubierta estuviera directamente orientada hacia el sur, al encontrarse ubicada la fábrica en el hemisferio norte.

Sin embargo, tal y como se ha estudiado en el apartado 4.1 del anexo textual IV, las pérdidas asociadas a esta orientación no óptima no serán muy superiores al 4%, lo que la hace una orientación suficientemente viable como para que su uso y aprovechamiento sea aceptable.

Entrando en detalle, y comenzando por el estudio asociado a la inclinación de la cubierta, su valor se encuentra bastante alejado del óptimo que, en caso de que se quiera maximizar la producción fotovoltaica durante todo el año, debería ser igual al valor de latitud (40º, aproximadamente).

Sin embargo, analizando los resultados otorgados por el software utilizado PVSyst, este cuantifica las pérdidas asociadas a una inclinación de 18º en un 4.5%, no suficientemente elevadas como para negar la viabilidad de la instalación en este sentido.

En términos generales, según PVSyst, las pérdidas generadas realizando una instalación de autoconsumo cuyo array fotovoltaico esté orientado 50º este y esté inclinado 18º,

se cuantifican en un 9.2%. Esta configuración correspondería a una instalación coplanar del array FV a la cubierta. Por otra parte, dotando de la inclinación óptima a los módulos fotovoltaicos a partir del uso de estructuras metálicas auxiliares, y estando estos orientados 50º este, las pérdidas se cuantifican en un 7.8%. Finalmente, si se decide utilizar estructuras auxiliares y, además, se orienta el campo FV hacia el sur, las pérdidas se cuantifican en un 0.1%.

En conclusión, lo óptimo sería inclinar los módulos entre 38 y 40º, y orientarlos hacia el sur. Esto solo se puede realizar a partir del uso de estructuras auxiliares. Sin embargo, cabe destacar que pérdidas de un 9.2%, a pesar de ser elevadas, no lo son suficientemente como para asegurar la no viabilidad de la instalación en estos términos.

La instalación sería viable igualmente, aunque no sería lo más eficiente posible.

Por otra parte, se debe saber que el uso de estructuras conlleva un coste económico asociado, que se estudiará posteriormente en los apartados 5.1.3 y 5.2.3, para las propuestas 1 y 2 estudiadas, respectivamente. A su vez, el uso de estas estructuras también conlleva realizar análisis técnicos, como son el estudio mecánico de la estructura y la separación óptima entre paneles para evitar pérdidas por sombreado.

- Superficie disponible y sombras. La superficie que se destine a soportar (y sobre la que se instale) la estructura asociada al campo fotovoltaico, se denominará superficie útil. Esta superficie, además, será aquella parte de la superficie total sobre la que podamos asegurar que queda fuera del rango de cualquier sombra que se pueda originar, y que además permite las tareas de mantenimiento asociadas a la instalación, sin generar riesgos a los técnicos que ejecuten esa labor.

En este caso, la cubierta de la industria, a dos aguas, se puede concebir como superficie útil, ya que no existen muchos elementos que ocupen espacio y/u originen sombras sobre la misma. Como único elemento que crea sombras, y que se puede observar a partir de la Figura 11, es la estructura levantada que está situada a la izquierda de la cubierta, vista esta desde el frente.



Figura 11. Industria vista desde arriba. Límites establecidos a partir de líneas rojas [26].

Al no poseerse estudios que detallen el desarrollo de estas sombras y la superficie que ocupan, se decide establecer un margen de seguridad, desde el extremo izquierdo de la

cubierta, que posea una longitud de 2.5 metros. El objetivo es reservar una parte de la superficie para evitar problemas asociados a sombreados.

Una vez establecido ese margen de referencia, se procede a obtener los datos geométricos de interés de la cubierta. Estos datos se han obtenido a partir de cotas establecidas sobre planos que el propietario de la fábrica ha proporcionado y que se presentan en el anexo digital III, a partir de un archivo AutoCAD, con nombre: "Planos Industria".

Con estos datos, se puede obtener un valor aproximado de la superficie sobre la que se podría instalar el campo fotovoltaico (ecuación 1), sin tener en cuenta aquella reservada a los pasillos de seguridad y mantenimiento.

$$S_{\text{ÚTIL}} = S_{\text{TOTAL}} - S_{\text{SOMBRA}} = 2 * [(Longitud - Sombras) * Anchura] \quad (1)$$

$$S_{\text{ÚTIL}} = 2 * [(Longitud - Sombras) * Anchura] = 2 * [(50.2m - 2.5m) * 10.37m] = 989.298m^2$$

Donde:  $S_{\text{SOMBRA}}$  es la superficie reservada destinada a evitar el impacto de sombras sobre el campo fotovoltaico; Sombras es la longitud asociada a esta superficie.

\* Los valores de longitud, anchura y sombras se han escogido viendo la fábrica desde el lateral.

\* El valor asociado a la superficie de la cubierta destinada a establecer caminos seguros para los operarios de mantenimiento, se calcula una vez se haya diseñado el campo fotovoltaico, y se haya calculado la distribución final del array FV en la cubierta.

Por otra parte, existen superficies conectadas a la cubierta, tanto por la parte anterior como por la parte posterior, que también podrían utilizarse para soportar la estructura asociada al campo fotovoltaico. Sin embargo, se espera que en días de lluvia estas superficies retengan gran cantidad de agua, lo que puede provocar la generación de sombreado que afecte al rendimiento de los paneles instalados sobre las mismas, y que no haga viable su uso para el fin citado. Por ello, se decide no entender estas superficies como útiles.

En las propuestas de instalación fotovoltaica que se presentan en el apartado 5, ninguna de ellas contemplará ni estudiará el uso de aquella vertiente de la cubierta con dirección al noroeste. Esta será una superficie que no se requerirá ocupar, por motivos de potencia dimensionada y espacio ocupado por los módulos requeridos. Además, no posee características técnicas que hagan viable su uso, ya que encarecerían la instalación al tener que utilizar estructuras auxiliares para orientar correctamente los módulos.

- Modalidad de autoconsumo. Sistema con excedentes acogido a compensación.

La modalidad de autoconsumo que más se adecua a las demandas del propietario es la modalidad de autoconsumo con excedentes acogido a compensación. Toda la información relacionada a esta modalidad se encuentra en los apartados 1.2, 3.1 y 5.2 del anexo textual III.

En términos de sí, en cuanto a condiciones exigidas, es viable o no, en este caso, acogerse a esta modalidad de autoconsumo, se puede confirmar que sí, ya que ambas propuestas planteadas en el apartado 5 no superan los 100kW de potencia eléctrica asignada, según el estudio realizado en el apartado 8 del anexo textual V.

Además, existiría posibilidad de conectarse a la red eléctrica interior de la industria, y en baja tensión, siendo los trámites asociados al contrato de acceso a la red más sencillos.

El procedimiento administrativo que debería seguir el propietario de la industria, para acogerse a esta modalidad se describe con detalle en el apartado 7.3 del anexo textual III.

- Recurso solar aprovechable por la industria. El estudio asociado al recurso solar del que dispone la industria es fundamental para realizar el dimensionado de potencia de la instalación de autoconsumo, además de confirmar la viabilidad de la instalación en este sentido. Este estudio se realiza en el apartado 5.1 del anexo textual IV.
- Demanda energética de la industria. El estudio asociado a la demanda energética de la industria también es fundamental para realizar el dimensionamiento de potencia de la instalación, y confirmar la viabilidad de la instalación en este sentido. Toda la información relacionada se detalla en el apartado 8 del anexo textual V.

## 2.3 Conclusión.

Tras realizar los diferentes estudios de viabilidad, se concluye que la industria posee características y recursos suficientes que hacen viable plantear, en cuanto a técnica y legislación, la realización de una instalación de autoconsumo que satisfaga la demanda energética de la misma, según demandas del cliente.

### *Apartado 3. Dimensionado de la potencia de la instalación de autoconsumo fotovoltaica [28,29].*

El dimensionado de potencia de la instalación de autoconsumo es uno de los pasos más importantes a la hora de dimensionar la instalación de autoconsumo. Tiene como objetivo determinar la cantidad óptima de potencia eléctrica fotovoltaica que el array fotovoltaico (array FV) necesita producir para satisfacer la demanda energética de la industria, en base a requerimientos del cliente, y evitando desaprovechamiento energético.

Para ello, se ha tenido como referencia todos los estudios de viabilidad realizados y descritos anteriormente. Cabe resaltar en este sentido los estudios realizados acerca del recurso solar y el consumo energético real de la fábrica, que son los que más información relevante proporcionan a la hora de realizar el dimensionado de potencia.

Este dimensionado potencia dependerá, principalmente, de los siguientes tres factores [28]:

- Qué porcentaje de la demanda energética de la industria quiere satisfacer el cliente.

- Uso de sistemas de almacenamiento por baterías.
- Modalidad de autoconsumo escogida.

### 3.1 Curva de demanda energética y curva de producción. Cobertura de demanda y aprovechamiento fotovoltaico [28].

A la hora de realizar un correcto dimensionado de potencia FV, uno de los principales objetivos es que la curva de la producción FV coincida con la curva asociada a la demanda energética.

Dos parámetros que permiten cuantificar cuán de bien hemos realizado el dimensionado, son la cobertura de la demanda energética y el aprovechamiento fotovoltaico. A continuación, se presenta la teoría asociada a estos conceptos:

*\* Existen más parámetros que permiten cuantificar la eficiencia de la instalación, pero estos son los más relevantes.*

- Cobertura de la demanda energética. Se define como la proporción de demanda energética total que es capaz de cubrir la energía eléctrica generada por la instalación de autoconsumo fotovoltaica. Se calcula a partir de la ecuación 2 [28].

$$\text{Cobertura}_{\text{demanda}}(\%) = \frac{\text{Demanda autoconsumida}}{\text{Demanda total}} \quad (2)$$

Este valor de cobertura se debe calcular hora a hora, comparando la energía FV producida con la demanda. Normalmente, se utilizan gráficas en las que se puede observar de forma muy simple esta cobertura. Más adelante, en este apartado, se mostrará y analizará, para las propuestas de instalación de autoconsumo realizadas, las curvas de producción y consumo asociadas.

- Aprovechamiento fotovoltaico (aprovechamiento FV). Se define como la proporción de energía eléctrica total producida a partir de la instalación fotovoltaica, que es finalmente autoconsumida por la industria. Se calcula a partir de la ecuación 3 [28].

$$\text{Aprovechamiento}_{\text{FV}}(\%) = \frac{\text{Energía fotovoltaica consumida}}{\text{Energía fotovoltaica producida}} \quad (3)$$

Cuanto mayor es este valor, más eficiente es el dimensionado realizado. Sin embargo, se debe saber que los valores de cobertura y aprovechamiento, en un sistema que no está acogido a compensación y no posee baterías, van “en direcciones cuantitativas contrarias”. Es decir, cuanto mayor es la cobertura de la demanda, menor es el aprovechamiento energético, y viceversa. Por ello, se deberá buscar una solución de compromiso, aquella que permita cubrir la mayor cantidad de demanda energética, para poder reducir lo máximo posible el coste económico de la factura eléctrica y, por otra parte, que el aprovechamiento energético sea lo más elevado posible, de forma que se evite desaprovechamientos energéticos.

De una u otra forma, se debe saber que el elemento que permite maximizar valores en ambos sentidos son las baterías, ya que aquella energía no consumida en un instante es utilizada para cargar la batería, y no se pierde. Sin embargo, en la modalidad de autoconsumo con excedentes,

la red eléctrica funciona como una batería, por lo que también permitirá maximizar valores en ambos sentidos, aunque no tan eficientemente a como lo hacen las baterías.

A la hora de realizar un dimensionado eficiente, se debe realizar un cálculo lo más aproximado posible que relacione la cantidad de energía que se va a consumir de la red, y la cantidad de energía que se va a verter a red. De esta forma, y conociendo el precio al que la comercializadora va a compensar el kWh vertido, se puede realizar un correcto dimensionado en el que toda la energía vertida a red, concebida a partir de ahora como una compensación energética, consiga compensar el coste económico asociado al consumo de la red en los horarios de producción fotovoltaica insuficiente.

Para poder cuantificar esta relación, se puede utilizar los mismos conceptos de cobertura de la demanda y aprovechamiento energético.

En este caso, respecto a la cobertura de la demanda, se busca que el valor asociado a la cantidad de energía autoconsumida más la cantidad de energía compensada por vertido a red, en un día, sea lo más próxima posible a la cantidad de energía demandada por la industria en ese mismo día. De esta forma, se busca conseguir una cobertura de la demanda del 100%.

En relación al aprovechamiento fotovoltaico, se busca que sea del 100%, de forma que toda la energía producida por la instalación fotovoltaica sea consumida o compensada, mediante el vertido a red.

### 3.2 Obtención de la potencia óptima a asignar para cada propuesta de instalación. Balance energético asociado.

La interpretación analítica de las ratios calculadas en el apartado 2 del anexo textual VI, sin una herramienta de software o una herramienta potente de cálculo, puede resultar muy costosa y complicada. Por ello, se utiliza una herramienta Excel, que es la que permite obtener el valor definitivo de la potencia a asignar a la instalación. Esta herramienta se proporciona en el anexo digital II, junto con su forma de utilización, para cada propuesta de instalación analizada.

Aportando la información requerida por la herramienta, se puede obtener valores aproximados, no totalmente precisos, de la cobertura de la demanda y el aprovechamiento fotovoltaico, para una determinada potencia asignada. Por otra parte, esta herramienta también permite obtener los porcentajes asociados a ahorro energético, ahorro económico y cantidad de energía vertida a red, además de información detallada asociada a estos parámetros.

En este trabajo, se obtiene el valor definitivo de la potencia a asignar para dos propuestas de instalación diferentes:

- Primera propuesta. Instalación de autoconsumo con campo fotovoltaico coplanar a la cubierta, inclinado 18º y con azimut 50º este.

*\* La herramienta Excel asociada se encuentra en el anexo digital II, con nombre: "Dimensionado de potencia - Propuesta uno".*

- Segunda propuesta. Instalación de autoconsumo con campo fotovoltaico cuya inclinación y orientación se fija a partir de estructuras auxiliares. Los paneles están inclinados 40º (inclinación óptima), y tienen azimut 0º sur.

*\* La herramienta Excel asociada se encuentra en el anexo digital II, con nombre: "Dimensionado de potencia - Propuesta dos".*

### 3.2.1 Propuesta 1. Potencia asignada y resultados obtenidos.

**La potencia fotovoltaica que se asignará a la instalación de autoconsumo, para poder conseguir los resultados mostrados a continuación, es de 50kW.**

*\* Resultados obtenidos a partir de un rendimiento total de la instalación estimado del 85%, y un precio pactado entre productor y comercializadora de 0.07€ por kWh vertido a red.*

*\* Información citada obtenida a partir de la herramienta Excel.*

- Cobertura de la demanda de un 80.12%. Una cobertura de la demanda del 80% es un valor suficientemente aceptable, siempre y cuando el aprovechamiento fotovoltaico sea igual o superior.
- Aprovechamiento fotovoltaico, teniendo en cuenta la suma de la energía consumida producida por la instalación fotovoltaica y la aprovechada por vertido a red, de un 80%. En este caso, se opta por escoger esta solución de compromiso. Obtener la mayor cantidad de cobertura de la demanda a la vez que obtener el mayor aprovechamiento fotovoltaico.
- Vertido a red de un 47%. El objetivo de verter a red es poder compensar la energía comprada de la red eléctrica, en los momentos de no suficiente producción fotovoltaica.
- Ahorro económico de un 67.03%. Los meses en los que más se prevé ahorrar son: abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre, llegando a alcanzar ahorros económicos próximos al 100% en los meses de mayo, junio, julio y agosto (épocas de mayor recurso solar). Por otra parte, los meses en los que se aprecia una menor reducción económica en la factura eléctrica son: enero, febrero, marzo, octubre, noviembre y diciembre, debido a la disminución en el recurso solar aprovechable.

En general, se ha pretendido maximizar el ahorro económico para todos los meses del año. Para obtener porcentajes mayores, se debería utilizar un sistema de almacenamiento con baterías.

- Ahorro energético de un 80.12%. El ahorro energético es considerable. Inicialmente, se estima una demanda energética anual de la industria, a red eléctrica, de 74441kWh. Finalmente, a partir del dimensionado de potencia realizado, se estima una demanda energética anual, a red, de 14795kWh.

Con estos objetivos, se pretende adecuar lo máximo posible la curva de producción de la instalación a la curva de demanda. Sobre todo, se intenta evitar sobredimensionar la instalación, de forma que no exista energía vertida a red que posteriormente no pueda ser compensada, por exceder la cuantía a compensar asociada a la energía comprada de la red. Esto supondría un coste económico innecesario invertido en la instalación, que corresponde evitar.

Una vez se conoce el dimensionado de potencia de la instalación, se puede obtener el balance energético de la instalación, a partir de las curvas de producción y consumo asociadas, que muestran “a golpe de vista” cuán de correcto ha sido dicho dimensionado y cuán de eficiente es. A continuación, a partir de la Figura 12, se muestran todas aquellas curvas gráficas, superpuestas, que representan el balance energético de la instalación.

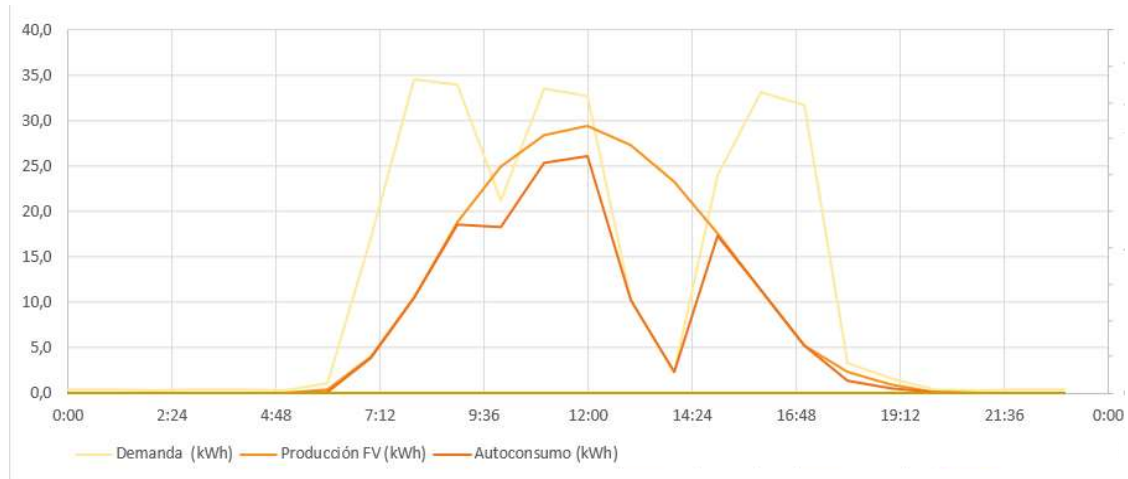


Figura 12. Balance energético de la instalación de autoconsumo, asociado a la primera propuesta realizada.

\* El eje x se asocia a valores temporales horarios, mientras que el eje y se asocia a valores medios horarios de energía, en kWh.

La curva asociada a la producción fotovoltaica es aquella que posee una forma similar a la denominada y conocida “campana de Gauss”. La curva asociada al autoconsumo, como no puede ser de otra manera, es aquella que se encuentra dentro de la curva asociada a producción fotovoltaica, y que sigue a la curva de demanda energética de la industria.

Mediante la interpretación de la gráfica citada, se concluye que la instalación de autoconsumo es capaz de suministrar la mayor parte de energía demandada, aunque no toda, cuando ésta está operando. En aquellos momentos que no opera, por falta de recurso solar, se demanda energía que tiene que ser comprada a la red eléctrica.

El objetivo tras realizar este dimensionado es que, en el periodo de descanso, la instalación de autoconsumo vierta la mayor cantidad de energía a la red, de forma que pueda compensar la energía consumida de la red en los momentos de no producción fotovoltaica y, por tanto, que se dé la mayor reducción económica posible en la factura de la luz.

### 3.2.2 Propuesta 2. Objetivos establecidos y conclusiones obtenidas.

**La potencia fotovoltaica que se deberá asignar a la instalación de autoconsumo, para poder conseguir los resultados mostrados a continuación, es de 46kW.**

\* Resultados obtenidos a partir de un rendimiento total de la instalación estimado del 85%, y un precio pactado entre productor y comercializadora de 0.07€ por kWh vertido a red.

\* Información citada obtenida a partir de la herramienta Excel.

- Cobertura de la demanda de un 86.90%. Este es un valor suficientemente correcto como para establecerlo como viable, además de que es mayor a la cobertura obtenida para la primera propuesta.
- Aprovechamiento fotovoltaico, teniendo en cuenta la suma de la energía consumida producida por la instalación fotovoltaica y la aprovechada por vertido a red, de un 86%.

Un aprovechamiento del 86%, junto con una cobertura del 86.90%, son resultados más que aceptables y viables, además de que superan en gran medida a los objetivos establecidos para la primera propuesta.

- Vertido a red de un 46%. El objetivo de establecer este vertido es el mismo que el comentado para la primera propuesta realizada. El vertido es un 1% menor al de la primera propuesta.
- Ahorro económico de un 68.92%. En este caso, el ahorro económico es mayor. Dicho ahorro aumenta si se asigna mayor potencia a la instalación. Sin embargo, en este caso, se observa que a más potencia se asigna, más desaprovechamiento de energía vertida a red se da.
- Ahorro energético de un 86.90%. El ahorro energético en este caso también es considerable y más elevado al caso anterior propuesto. Inicialmente, se estima una demanda energética anual de la industria, a red eléctrica, de 74441kWh. Finalmente, a partir del dimensionado de potencia realizado, se estima una demanda energética anual, a red, de 9752kWh. Esto es 5043kWh menos energía demandada, en comparación con la otra propuesta.

Como se puede observar, a partir de los objetivos establecidos y su análisis, en este caso la potencia de la instalación fotovoltaica es menor, lo que requiere de menos módulos a utilizar e implica menor coste y, sin embargo, los objetivos/resultados son mayores.

Habría que tener en cuenta que el coste de la instalación será mayor, debido a la necesidad de utilizar estructuras auxiliares, que orienten e inclinen los módulos según lo deseado.

Este análisis confirma la viabilidad de realizar la instalación del campo fotovoltaico a partir de estructuras auxiliares.

En cuanto al balance energético de la instalación de autoconsumo, los objetivos buscados son los mismos que los mencionados para la primera propuesta. Los resultados asociados se pueden visualizar a partir de la Figura 13, que se muestra a continuación:

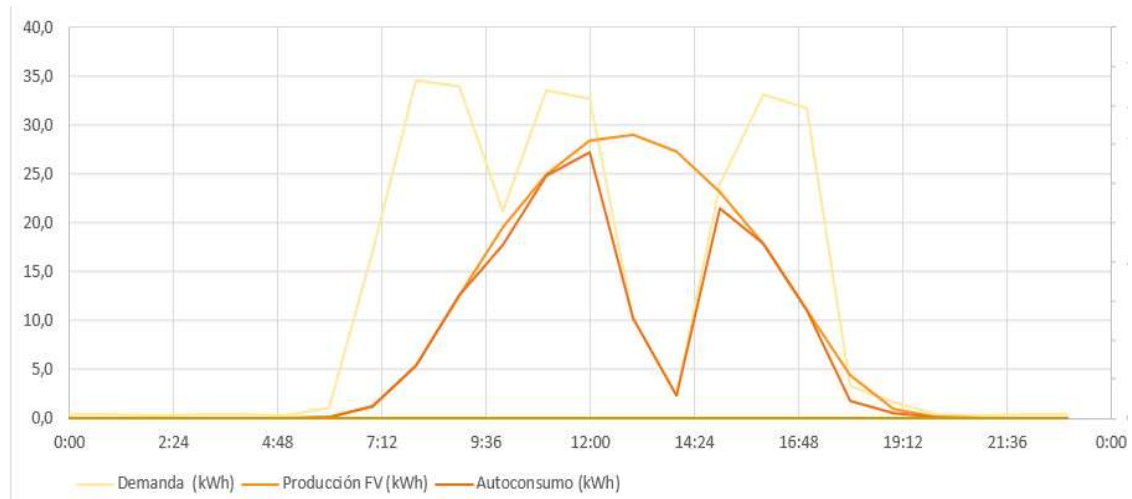


Figura 13. Balance energético de la instalación de autoconsumo, asociado a la segunda propuesta realizada.

Como se puede observar, el aprovechamiento fotovoltaico es muy elevado. La mayor parte de la energía producida por la instalación FV es consumida por la industria, excepto en los recesos, que la energía producida es vertida a red. Fuera de los periodos de producción fotovoltaica, toda la energía consumida es comprada de la red.

Por otra parte, es relevante darse cuenta que, debido a la inclinación y orientación del array FV, la curva de producción y autoconsumo está desplazada hacia la derecha.

El objetivo en este caso es el mismo que para la primera propuesta y se consigue notablemente mejor, en términos de aprovechamiento energético. En términos de ahorro económico, aumenta, pero no notablemente con respecto al caso anterior. En el caso de que se utilizara un sistema de almacenamiento por baterías, se incrementarían todos los parámetros anteriormente analizados, y en especial el ahorro económico.

#### *Apartado 4. Procedimiento teórico analítico a seguir para dimensionar la instalación fotovoltaica. Condiciones a cumplir.*

*\* El datasheet del módulo fotovoltaico utilizado y del inversor de red utilizado se proporcionan en el anexo digital I. El datasheet del módulo posee nombre: "Módulo fotovoltaico JKM585M-7RL4-V" y el datasheet del inversor posee nombre: "Inversor solar de red SUN2000-50KTL-M0".*

El procedimiento teórico analítico a seguir para dimensionar la instalación fotovoltaica, se muestra a continuación.

Para realizar el dimensionado de la instalación, es fundamental conocer el funcionamiento de los diferentes componentes utilizados bajo las condiciones reales de operación. Esto nos permitirá conocer cómo se deberá disponer el array FV en la cubierta, para que la conexión con el inversor de red sea correcta y eficiente, y se consiga maximizar la producción del campo FV.

## 4.1 Cálculos de los parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico bajo condiciones reales de trabajo.

\* Los cálculos analíticos concretos asociados a cada una de las propuestas de instalación de autoconsumo planteadas, para el módulo fotovoltaico y el inversor de red elegidos, se presentan en el apartado 4 del anexo textual VI.

A continuación, se presentan las fórmulas matemáticas necesarias a aplicar y que permiten calcular el valor de los diferentes parámetros eléctricos del módulo para las condiciones reales de trabajo y de interés:

- Temperatura de operación. La ecuación 4 [30] permite calcular el valor de la temperatura de operación del módulo para unas determinadas condiciones de temperatura ambiente.

\* En el apartado 5.2 del anexo textual IV se realiza un estudio acerca del impacto que la temperatura media anual del emplazamiento tendría sobre el rendimiento anual del módulo fotovoltaico utilizado.

El módulo fotovoltaico utilizado se cita en el apartado 5 de la sección de desarrollo.

$$T_{\text{módulo}}(T_{\text{ambiente}}) = T_{\text{ambiente}} + G \left( \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right) * \frac{\text{NOTC } (^{\circ}\text{C}) - 20^{\circ}\text{C}}{0.8 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}} \quad (4)$$

Donde:  $T_{\text{módulo}}$  es la temperatura de operación del módulo para una determinada temperatura ambiente (se mide en  $^{\circ}\text{C}$ );  $T_{\text{ambiente}}$  es la temperatura ambiente del emplazamiento objeto de estudio (se mide en  $^{\circ}\text{C}$ );  $G$  es el valor máximo de irradiancia directa que recibe el emplazamiento objeto de estudio (normalmente se asocia valor igual a  $1 \text{ kW/m}^2$  [30]); NOTC es la temperatura nominal de operación de la célula fotovoltaica (se mide en  $^{\circ}\text{C}$ ).

En condiciones STC, el fabricante proporciona datos asociados al desempeño eléctrico del panel cuando este se encuentra a una temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$ . Sin embargo, en la realidad, el panel se encuentra a una temperatura mucho mayor a la utilizada por el fabricante como referencia. Este aumento de la temperatura origina una disminución en el rendimiento del panel. Por ello, es importante calcular el valor real al que va a operar el módulo fotovoltaico, para calcular las variaciones en el rendimiento, y poder hacer un dimensionado correcto y preciso.

- Tensión en circuito abierto ( $V_{\text{OC}}$ ). La ecuación 5 [30] permite calcular el valor de la tensión en circuito abierto asociada al módulo fotovoltaico para una temperatura de operación del módulo determinada.

$$V_{\text{OC}}(T_{\text{módulo}}) = V_{\text{OC}-T_{\text{STC}}} + V_{\text{OC}-T_{\text{STC}}} * \beta * (T_{\text{módulo}} - 25^{\circ}\text{C}) \quad (5)$$

Donde:  $V_{\text{OC}-T_{\text{STC}}}$  es la tensión en circuito abierto del módulo para condiciones de temperatura STC (se mide en voltios, V);  $\beta$  es el coeficiente de pérdidas por temperatura, asociado a tensión en circuito abierto (se mide en  $\%/^{\circ}\text{C}$ ), y es un valor negativo.

Los valores  $V_{OC-T_{STC}}$  y  $\beta$  son proporcionados por el fabricante del módulo fotovoltaico y están citados en su datasheet.

Por otra parte, como se puede observar, la tensión en circuito abierto del módulo y, por tanto, del string y array fotovoltaico, aumenta para temperaturas decrecientes, fenómeno que tendrá que respetar el campo FV respecto de los parámetros máximos de entrada, asociados a tensión, permitidos por el inversor.

En este caso, el valor que se calculará como valor de interés será el de la tensión de circuito abierto máxima, calculado a partir de la temperatura mínima de operación del módulo.

- Tensión de módulo cuando trabaja en el punto de máxima potencia (PMP). La ecuación 6 [30] permite calcular el valor de la tensión proporcionada por el módulo fotovoltaico, cuando este trabaja en el punto de máxima potencia, en función de la temperatura de operación del mismo.

$$V_{PMP}(T_{\text{módulo}}) = V_{PMP-T_{STC}} + V_{PMP-T_{STC}} * \beta * (T_{\text{módulo}} - 25^{\circ}\text{C}) \quad (6)$$

Donde:  $V_{PMP-T_{STC}}$  es la tensión proporcionada por el módulo cuando éste trabaja en su punto de máxima potencia, para condiciones de temperatura STC (se mide en voltios, V).

El valor  $V_{PMP-T_{STC}}$  es proporcionado por el fabricante en el datasheet del módulo fotovoltaico.

En este caso, dicho valor se incrementa a medida que disminuye la temperatura de operación del módulo y se decreta a medida que aumenta esta temperatura.

Para este caso, los valores de interés a calcular, trabajando en el PMP, serán 2. Se necesitará calcular el valor de la tensión mínima, proporcionada por el módulo cuando este trabaja a su temperatura de operación máxima, y el valor de la tensión máxima, proporcionada por el módulo cuando este trabaja a una temperatura de operación mínima. Con estos dos valores, y teniendo en cuenta el rango de temperaturas de operación, se puede obtener el rango de valores de voltaje que el módulo puede ofrecer trabajando en su PMP. Este rango será de gran utilidad conocerlo a la hora de realizar la conexión del campo FV con el inversor, ya que deberá de cumplir con unas determinadas condiciones, que se mencionarán más adelante.

- Corriente de cortocircuito ( $I_{SC}$ ). La ecuación 7 [30] permite calcular el valor de la corriente de cortocircuito asociada al módulo fotovoltaico para una temperatura de operación del módulo determinada.

$$I_{SC}(T_{\text{módulo}}) = I_{SC-T_{STC}} + I_{SC-T_{STC}} * \delta * (T_{\text{módulo}} - 25^{\circ}\text{C}) \quad (7)$$

Donde:  $I_{SC-T_{STC}}$  es la corriente de cortocircuito del módulo para condiciones de temperatura STC (se mide en amperios, A);  $\delta$  es el coeficiente de pérdidas por temperatura asociado a corriente de cortocircuito (se mide en  $\%/^{\circ}\text{C}$ ), y es un valor positivo.

El coeficiente de pérdidas  $\delta$  es proporcionado por el fabricante del módulo fotovoltaico, y está citado en su datasheet.

Como se puede observar, a mayor es la temperatura de operación del módulo, mayor es el valor de corriente de cortocircuito que proporciona. Por ello, a la hora de conectar la salida del array fotovoltaico a la entrada correspondiente del inversor, habrá que verificar que la corriente de cortocircuito del array no supera la corriente máxima permitida por el inversor en sus entradas.

En este caso, como valor de interés a calcular, será la corriente de cortocircuito máxima, que se calculará a partir de la temperatura máxima de operación del módulo.

- Potencia proporcionada. La ecuación 8 [30] permite calcular el valor de la potencia proporcionada por el módulo fotovoltaico, trabajando en su punto de máxima potencia, para una temperatura de operación del módulo determinada.

$$P_{PMP}(T_{\text{módulo}}) = P_{PMP-T_{STC}} + P_{PMP-T_{STC}} * \lambda * (T_{\text{módulo}} - 25^{\circ}\text{C}) \quad (8)$$

Donde:  $P_{PMP-T_{STC}}$  es la potencia proporcionada por el módulo, cuando este trabaja en su PMP, para condiciones de temperatura STC;  $\lambda$  es el coeficiente de pérdidas por temperatura asociado a potencia producida trabajando en el PMP (se mide en %/°C), y es un valor negativo.

El coeficiente de pérdidas  $\lambda$  es proporcionado por el fabricante del módulo fotovoltaico, y está citado en su datasheet.

La potencia proporcionada por el módulo disminuye a mayor es la temperatura de operación del mismo. Por ello, instalaciones fotovoltaicas que se encuentren en lugares con temperaturas ambiente medias elevadas, desarrollaran un desempeño notablemente menor al teórico calculado a partir de los datos proporcionados por el fabricante en el datasheet del módulo fotovoltaico utilizado.

En este caso, el valor de interés a calcular será la potencia proporcionada para la temperatura máxima de operación del módulo.

El cálculo de este parámetro posee una gran relevancia a la hora de conocer la potencia total real instalada asociada al campo FV y, por tanto, también a la hora de elegir el inversor adecuado en relación a esto último. Todo lo asociado a este hecho se citará y describirá posteriormente.

## 4.2 Conexión entre campo FV e inversor solar. Condiciones a cumplir en tensión y corriente [31].

Una vez conocidos los parámetros eléctricos del módulo fotovoltaico que interesa estudiar y calcular (bajo condiciones reales de funcionamiento), a la hora de realizar el dimensionado del campo FV, ya se pueden presentar las condiciones que deberán cumplir tanto el array fotovoltaico como el inversor, a la hora de conectar la salida de uno (array) a la entrada del otro (inversor). La aplicación de estas condiciones será fundamental para asegurar un buen funcionamiento de la instalación, y su desempeño correcto y óptimo.

Siempre deberemos asegurarnos que los parámetros de tensión y corriente asociados al campo FV están dentro del rango de funcionamiento correcto del inversor solar.

Entonces, conociendo lo mencionado, se presenta una imagen muy representativa de la conexión que se debe realizar (Figura 14), en términos de tensión, entre array fotovoltaico e inversor, y del rango de valores de tensión entre los que tienen que funcionar ambos componentes.

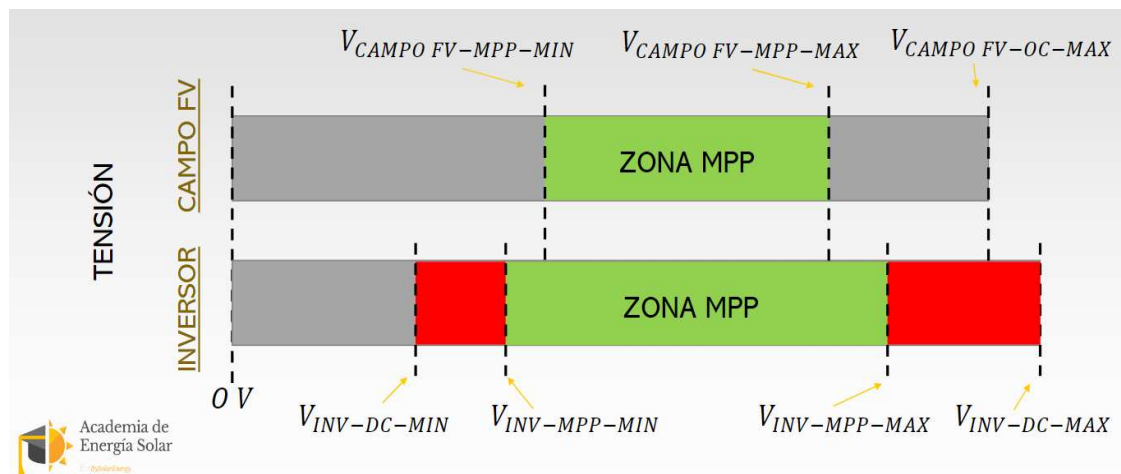


Figura 14. Condiciones de conexión, en términos de tensión, entre array fotovoltaico e inversor.

Donde: DC es el término inglés asociado a CC;  $V_{INV-DC-MIN}$  es la tensión mínima que el inversor exige introducir a su entrada, en CC, para que no existan pérdidas de potencia por derating (se mide en voltios, V);  $V_{INV-DC-MAX}$  es la tensión máxima que el inversor permite introducir a su entrada, en CC (se mide en voltios, V);  $V_{CAMPO FV-MPP-MIN}$  es la tensión mínima proporcionada por el campo FV trabajando en su PMP;  $V_{CAMPO FV-MPP-MAX}$  es la tensión máxima proporcionada por el campo FV trabajando en su PMP;  $V_{INV-MPP-MIN}$  es la tensión mínima que el campo FV, trabajando en su PMP, debe introducir a la entrada del inversor para que este asegure operar a su máximo rendimiento;  $V_{INV-MPP-MAX}$  es la tensión máxima que el campo FV, trabajando en su PMP, debe introducir a la entrada del inversor para que este asegure operar a su máximo rendimiento;  $V_{CAMPO FV-OC-MAX}$  es la tensión máxima de circuito abierto proporcionada por el campo FV.

Antes de proceder a detallar las condiciones a cumplir, tanto en términos de tensión como de corriente, de forma que se cumpla con los criterios de operatividad segura y correcta de ambas partes de la instalación, se cree conveniente explicar lo siguiente:

- El inversor posee y define su propio rango de operación en tensión, en el que asegura funcionar a pleno rendimiento, siempre y cuando los rangos de tensión con los que trabaje el campo FV, en su PMP, y que introduzca a la entrada del inversor, sean los mismos.
- En la imagen, a este rango del inversor se le denomina “ZONA MPP”.
- Si los límites del rango de tensión entre los que opera el campo FV (zona MPP del campo) no están dentro de los límites del rango de tensión del inversor, este no asegura trabajar

a su máximo rendimiento, produciéndose un *derating* del inversor y, por tanto, pérdidas en la potencia total convertida.

A su vez, el inversor posee valores máximos y mínimos de tensión y corriente, que el campo FV debe respetar si se desea que el sistema opere correctamente. Los valores mínimos se deben respetar para que el inversor pueda empezar a funcionar, mientras que los valores máximos se deben respetar para que el inversor no se destruya.

Por otra parte, existen condiciones a cumplir asociados a tensión y a corriente. A continuación, se citan y describen dichas condiciones.

- Condiciones en tensión a cumplir.

En primer lugar, se debe verificar que el valor máximo de circuito abierto asociado al campo FV diseñado no supera el valor máximo de tensión permitido por el inversor escogido, en CC. Para ello, se tiene que cumplir la condición asociada a la ecuación 9 [31].

$$V_{\text{CAMPO FV-OC-MAX}} < V_{\text{INV-DC-MAX}} \quad (9)$$

En segundo lugar, se debe verificar que el rango de tensiones proporcionado por el campo fotovoltaico, trabajando en su PMP, se encuentra dentro del rango de valores de tensión (zona MPP) sobre los que el inversor asegura operar a máxima eficiencia. Para ello, se tienen que cumplir las condiciones asociadas a las ecuaciones 10 [31] y 11 [31].

$$V_{\text{CAMPO FV-MPP-MIN}} \geq V_{\text{INV-MPP-MIN}} \quad (10)$$

$$V_{\text{CAMPO FV-MPP-MAX}} \leq V_{\text{INV-MPP-MAX}} \quad (11)$$

En tercer y último lugar, el campo fotovoltaico debe proporcionar a la entrada del inversor una tensión en DC mínima que permita al inversor operar correctamente, aunque el rango de tensiones del campo fotovoltaico, operando en su PMP, no se encuentre perfectamente definido sobre la zona MPP. En estos últimos casos, en los que no se cumple alguna de las condiciones asociados a las ecuaciones 10 o 11, es el inversor el que se encarga de hacer trabajar al campo fotovoltaico en un punto, diferente a su PMP, que permita que el rango de tensiones de operación del campo esté dentro de la zona MPP del inversor, pudiendo este trabajar a su máximo rendimiento.

- Condiciones en corriente a cumplir.

En términos de corriente, la principal condición que se deberá cumplir es que la corriente de cortocircuito máxima sea menor a la corriente máxima, en DC, a introducir por entrada del inversor (ecuación 12 [31]). Es decir, se debe de cumplir la siguiente condición:

$$I_{\text{CAMPO FV-SC-MAX}} < I_{\text{INV-DC-MAX}} \quad (12)$$

Otra condición que se deberá cumplir es que la corriente del array FV, trabajando en su PMP, no supere el valor de corriente máxima permitida por el inversor de red (ecuación 13 [31]), siempre y cuando el inversor proporcione este valor.

$$I_{\text{CAMPO FV-PMP-MAX}} < I_{\text{INV-PMP-MAX}} \quad (13)$$

### 4.3 Conformación del array o campo FV. Distribución de módulos. Asociación con el inversor seleccionado. Análisis a realizar y condiciones a cumplir [32].

Llegados a este punto, ya se sabe cómo calcular el valor de los diferentes parámetros característicos claves, asociados al módulo fotovoltaico, para las condiciones reales de funcionamiento y, también, se sabe cuáles son las diferentes condiciones técnicas que se deben cumplir para que la conexión entre campo FV e inversor solar sea correcta y lo más eficiente posible. A continuación, teniendo como referencia toda esta información, se va a explicar el proceso a seguir para conformar el array o campo FV correctamente.

En primer lugar, se debe conocer qué cantidad de módulos vamos a requerir instalar para conformar una instalación de autoconsumo fotovoltaico que proporcione la potencia deseada, destinada a suplir aquel porcentaje, que deseemos, de la demanda energética de la industria.

Para ello, necesitamos conocer qué cantidad de potencia eléctrica queremos que la instalación de autoconsumo nos proporcione (potencia asignada) y, también, qué cantidad de potencia va a poder suministrar cada módulo elegido, en las mejores condiciones de funcionamiento (potencia nominal)

Por lo tanto, la expresión asociada al cálculo del número de módulos totales que vamos a necesitar instalar para obtener la potencia eléctrica deseada, en función del rendimiento de dichos módulos para las condiciones de trabajo nominales, es la ecuación 14 [32].

$$N_{\text{módulos}_{\text{Total}}} = \frac{P_{\text{CampoFV-deseada}}}{P_{\text{PMP}}} \quad (14)$$

*\* En función de las dimensiones del módulo escogido, y de las estructuras asociadas en caso que corresponda, se deberá asegurar que la superficie útil de la que se dispone es lo suficientemente grande, y está capacitada mecánicamente, para dar cabida y soportar la estructura conformada por todos los módulos calculados anteriormente.*

*En caso de que esto no sea posible, se deberá reducir el número de módulos, o se deberá buscar otras superficies útiles sobre las que instalar los módulos que resten, siempre y cuando aseguren el correcto funcionamiento de la instalación, en todos los sentidos.*

Una vez se conoce el número de módulos que se necesitan instalar, se necesita estudiar cómo se van a conectar estos módulos entre sí, en serie y en paralelo, para conformar el array fotovoltaico, y que este cumpla con las condiciones de tensión y corriente ya mencionadas.

En primer lugar, se calculará la cantidad de módulos mínima y máxima que podemos asociar a un string del campo FV. Estos valores se calculan en función de la tensión mínima que proporcione cada panel, trabajando en su PMP, y en función de las tensiones mínima y máxima que limiten el rango de tensiones de la zona MPP del inversor. La expresión asociada al cálculo es la ecuación 15 [32].

$$\frac{V_{\text{INV-MPP-MIN}}}{V_{\text{PMP}_{\text{MÍN}}}} \leq N_{\text{módulos}_{\text{string}}} \leq \frac{V_{\text{INV-MPP-MAX}}}{V_{\text{PMP}_{\text{MÍN}}}} \quad (15)$$

En segundo lugar, una vez se conoce el número de módulos que van a conformar cada string, en función de los parámetros eléctricos del módulo y del inversor, y de la superficie útil disponible, el número de strings mínimo que se pueden colocar en paralelo, conformando finalmente el array fotovoltaico, se calcula a partir de la ecuación 16 [32].

$$N_{strings} \geq \frac{N_{módulos_{Total}}}{N_{módulos_{String}}} \quad (16)$$

Tras realizar los cálculos se observará que no hay una única solución. Por ello, siempre, se deberá buscar la solución más adecuada, que más aproveche las características de módulos e inversor, y que asegure que ambos trabajan en los rangos de tensión y corriente permitidos. A su vez, por otra parte, estos cálculos se deberán realizar siempre teniendo como referencia la superficie útil disponible y, por tanto, los resultados se deberán adecuar a dicha característica de la industria.

Para terminar, además de cumplir con todo lo anterior mencionado, se deberá asegurar que se cumple con las condiciones de tensión y corriente asociadas a las ecuaciones 9 y 12, respectivamente.

### *Apartado 5. Presentación de las propuestas de instalación de autoconsumo. Resultados analíticos asociados y resultados obtenidos en AutoCAD y PVSyst. Análisis económico y análisis de viabilidad.*

*\* Los archivos PVSyst, junto con el reporte de las simulaciones, se proporcionan en el anexo digital IV.*

Las características generales de las instalaciones de autoconsumo propuestas, a instalar en la industria objeto de estudio, que satisface las demandas del propietario, son:

- Conexión de la instalación en baja tensión, a través de red interior.
- Superficie útil sobre la que instalar el campo fotovoltaico igual a 494.6 m<sup>2</sup>, asociada a la vertiente de la cubierta que posee azimut 50° este. Este valor disminuirá dependiendo de cómo se conforme el array FV en cada caso, ya que falta restar la superficie destinada a realizar las labores de mantenimiento correctamente (pasillos sobre la cubierta, margen respecto del vacío...).
- Sistema de almacenamiento con baterías no utilizado.
- Instalación asociada a la modalidad de instalación de autoconsumo con excedentes acogida a compensación.

En cuanto al panel fotovoltaico y el inversor de red elegidos, son los mismos para ambas propuestas de instalación estudiadas.

*\* Se debe recordar que, para evitar las pérdidas por mismatch, tanto en tensión como en corriente, se debe conformar el array FV con módulos que posean las mismas características. De esta forma, se maximiza el rendimiento del array y, en definitiva, la producción eléctrica.*

Para conseguir obtener las potencias nominales de cada propuesta de instalación, calculadas a partir del análisis de dimensionamiento de potencia realizado, se decide utilizar un panel fotovoltaico JKM585M-7RL4-V, de Jinko Solar, que consigue proporcionar potencias pico de hasta 585W. Esta elección se ha realizado en base al estudio de rentabilidad, realizado en el apartado 3.6 del anexo textual II, y en base a las características del módulo.

Las características más relevantes asociadas a este panel fotovoltaico se detallan en el apartado 3.1 del anexo textual VI. También se puede consultar todas sus características a partir de su *datasheet*, proporcionado en el anexo digital I, con el nombre: "Módulo fotovoltaico JKM585M-7RL4-V".

Por otro lado, el inversor de red utilizado y destinado a realizar la transformación de energía eléctrica en CC, proveniente del array FV, a CA, de la forma más óptima posible y desarrollando el máximo rendimiento, es el SUN2000-50KTL-M0 *Smart String Inverter*, de Huawei.

Las características más relevantes asociadas a este inversor de red se detallan en el apartado 3.2 del anexo textual VI. También se puede consultar todas sus características a partir de su *datasheet*, proporcionado en el anexo digital I con el nombre: "Inversor solar de red SUN2000-50KTL-M0".

## 5.1 Propuesta 1 de instalación. Cálculos asociados a la conformación del array FV y conexión con el inversor de red. Resultados obtenidos. Análisis económico. Estudio de viabilidad.

Esta primera propuesta de instalación poseerá una potencia asignada de 50kW, según el dimensionamiento de potencia realizado en el apartado 3.

Esta es la propuesta más sencilla planteada, ya que el array fotovoltaico se concibe para ser instalado de forma coplanar a la cubierta, sin necesidad de estructuras auxiliares. De esta forma, se invierte menos dinero en la instalación, pero el rendimiento de la misma es menor, ya que no aprovecha todo el recurso solar.

Se analizará tanto las características técnicas como económicas de la propuesta de instalación, a partir del software de simulación PVSyst.

### 5.1.1 Procedimiento teórico y analítico seguido, para conformar el array FV y su conexión con el inversor de red.

Entonces, por un lado, se ha seguido el procedimiento teórico y analítico necesario a aplicar, y descrito en el apartado 4 para conformar el array FV. Este procedimiento, junto con los resultados asociados, se presenta en el apartado 4.1 del anexo textual VI.

De esta forma, se obtiene la más eficiente forma de disponer el array FV sobre la cubierta, estableciendo la conexión adecuada y óptima con el inversor de red escogido y utilizado.

A continuación, se presentan los resultados finales obtenidos de forma resumida:

- El array fotovoltaico estará compuesto por un total de 85 módulos.

Se conformarán 5 strings, compuestos por 17 módulos cada uno de ellos.

### 5.1.2 Disposición del array FV sobre la superficie útil.

El diseño asociado a la disposición geométrica establecida para este array fotovoltaico, es decir, cómo se van a disponer los módulos en la cubierta, se ha diseñado a partir de AutoCAD. El archivo AutoCAD, con nombre: "Disposición array FV. Propuesta uno", se proporciona en el anexo digital III y a continuación se muestra a partir de la Figura 15.

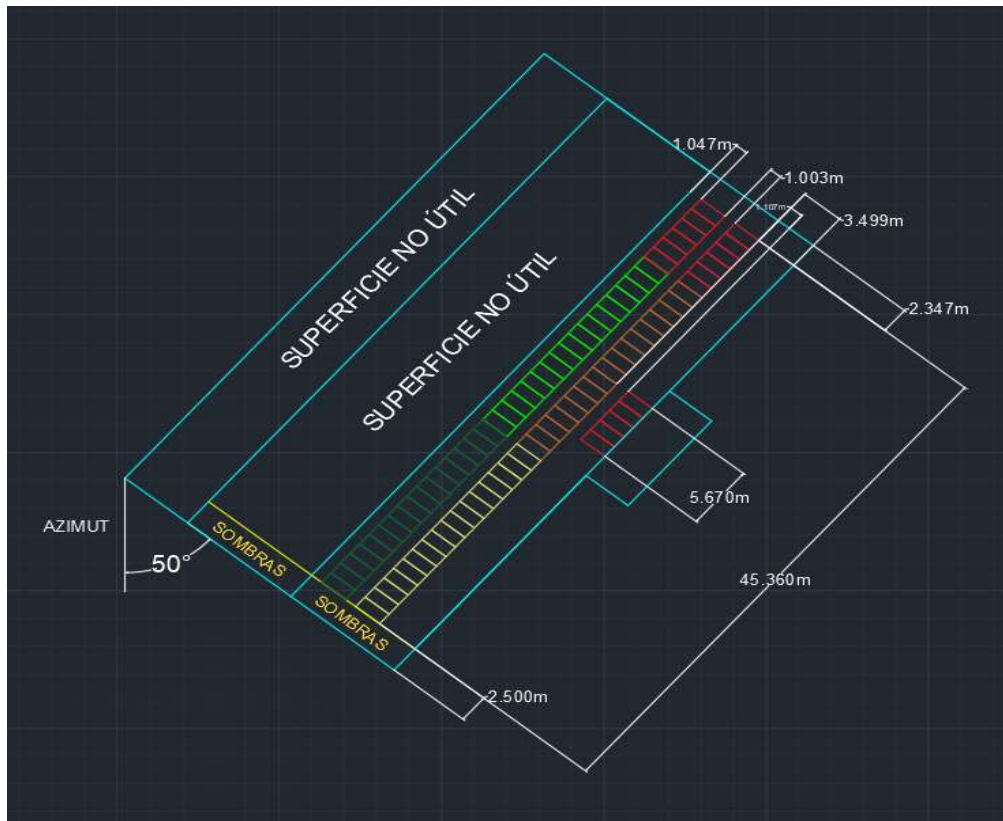


Figura 15. Planta de la cubierta. Disposición del array FV asociado a la propuesta de instalación 1, junto con las cotas asociadas.

A partir de las cotas establecidas en el diseño, se han calculado las diferentes superficies de interés a conocer.

En este caso, el array fotovoltaico ocupará una superficie total de  $232.41 \text{ m}^2$ . La superficie total útil de la vertiente, calculada anteriormente, es igual a  $494.65 \text{ m}^2$ . Por lo tanto, la superficie destinada a los usos anteriores mencionados resultará de la diferencia:  $262.24 \text{ m}^2$ .

\* La superficie asociada al saliente de la vertiente utilizada, con anchura  $10.213 \text{ m}$ , no se concibe como superficie útil. Sin embargo, esta puede aprovecharse por los técnicos de mantenimiento para realizar las labores que fueran oportunas.

### 5.1.3 Análisis del balance energético y económico de la instalación a partir de PVSyst.

Una vez se tienen todos los datos que definen la instalación de autoconsumo, asociados al array FV y al inversor, estos se introducen en el software PVSyst.

*\* La configuración establecida asociada a los parámetros de entrada necesarios a introducir en PVSyst, para realizar la simulación de acuerdo a las características de la instalación planteada, se detalla en el apartado 2.1 del anexo textual VII.*

Tras introducir y configurar los parámetros de entrada de la simulación de la forma descrita, se realiza la simulación de la instalación de autoconsumo fotovoltaica propuesta.

Los resultados más significativos que PVSyst proporciona, tras realizar la simulación, son los siguientes:

*\* El reporte de la simulación se proporciona en el anexo digital IV. Posee el siguiente nombre: "Reporte - Simulación propuesta uno - 50kW".*

- Análisis del rendimiento y balance energético de la instalación.

La producción total anual del sistema fotovoltaico, con una proporción de rendimiento calculada igual a 0.897, es de 79MWh/año. La distribución energética del sistema es la siguiente:

Suponiendo la eficiencia de los módulos fotovoltaicos la especificada por el fabricante en condiciones STC (21.4%), se obtiene una energía total anual producida por el array de 85.5MWh. Debido a pérdidas por irradiancia, temperatura y *missmatch*, el array consigue producir trabajando en su PMP un total de 80.1MWh y. Tras las pérdidas en la conversión de CC a CA, asociados al rendimiento del inversor, este consigue proporcionar a la salida 79MWh.

De estos 79MWh proporcionados por el inversor a su salida, 61.91MWh son consumidos por la industria, lo que supone una cobertura de la demanda del 78.37%.

De los 61.91MWh, 54.6MWh son vertidos a la red. Esto supone un vertido a red del 88.19%.

En cuanto a la energía consumida de la red, la simulación la cuantifica en 37.4MWh.

La cobertura de la demanda de la instalación, con un 78.37%, es aceptable, aunque el objetivo es alcanzar el 100% y el rendimiento general de la instalación se cuantifica en un 89.74%, un valor suficientemente aceptable.

La mayor cantidad de energía producida por la instalación fotovoltaica y otorgada a la industria es vertida a red y se utilizará para compensar la energía comprada de la red, en los periodos de no suficiente producción FV.

Suponiendo que la comercializadora valora el kWh vertido a menor precio que el kWh comprado, siempre se requerirá que la energía vertida sea mayor a la energía

comprada. Sin embargo, los valores idóneos de energía vertida y comprada solo se podrán calcular una vez se conozca el precio pactado entre el productor y la empresa comercializadora.

En cuanto a si estos resultados confirman la viabilidad de la instalación, tal y como se explica en el apartado 3, el objetivo es que la cobertura de la demanda de la instalación sea lo más elevado posible. En este caso, cuantificándose en un 89.74%, es suficientemente elevado.

Por otra parte, otro punto a favor de la instalación es el vertido de energía a red, que es mayor a la cantidad de energía comprada de la red eléctrica. De esta forma, se asegura que toda la energía consumida de la red vaya a ser compensada económicamente con la energía vertida a la red, notándose en una reducción significativa en el coste económico de la factura de la luz.

- Análisis económico de la instalación.

El coste total de la instalación, asociado a paneles fotovoltaicos e inversor de red, incluyendo impuestos, es de 19523.5 euros.

El *payback time* o tiempo de recuperación de la inversión es igual a 2.6 años, aunque este aumenta si añadimos todos los costes restantes.

Para una duración de 30 años, supuesta vida útil de la instalación, el *Net Present Value* o Valor Actual Neto (VAN) de la instalación llega a alcanzar los 200526 euros, de forma que se obtiene una recuperación de la inversión igual al 1027.1%.

Los valores asociados al balance económico de la instalación se pueden observar y analizar a partir de la Tabla 3 .

	Electricity sale	Run. costs	Deprec. allow.	Taxable income	Taxes	After-tax profit	Self-cons. saving	Cumul. profit	% amorti.
2022	3'819	0	0	3'819	0	3'819	3'572	-12'609	37.9%
2023	3'876	0	0	3'876	0	3'876	3'572	-5'161	76.0%
2024	3'933	0	0	3'933	0	3'933	3'572	2'344	114.4%
2025	3'991	0	0	3'991	0	3'991	3'572	9'906	153.2%
2026	4'048	0	0	4'048	0	4'048	3'572	17'526	192.2%
2027	4'105	0	0	4'105	0	4'105	3'572	25'203	231.5%
2028	4'163	0	0	4'163	0	4'163	3'572	32'938	271.1%
2029	4'220	0	0	4'220	0	4'220	3'572	40'729	311.1%
2030	4'277	0	0	4'277	0	4'277	3'572	48'578	351.3%
2031	4'334	0	0	4'334	0	4'334	3'572	56'484	391.8%
2032	4'392	0	0	4'392	0	4'392	3'572	64'448	432.5%
2033	4'449	0	0	4'449	0	4'449	3'572	72'469	473.6%
2034	4'506	0	0	4'506	0	4'506	3'572	80'547	515.0%
2035	4'564	0	0	4'564	0	4'564	3'572	88'682	556.7%
2036	4'621	0	0	4'621	0	4'621	3'572	96'875	598.6%
2037	4'678	0	0	4'678	0	4'678	3'572	105'125	640.9%
2038	4'735	0	0	4'735	0	4'735	3'572	113'432	683.4%
2039	4'793	0	0	4'793	0	4'793	3'572	121'796	726.3%
2040	4'850	0	0	4'850	0	4'850	3'572	130'218	769.4%
2041	4'907	0	0	4'907	0	4'907	3'572	138'697	812.9%
2042	2'482	0	0	2'482	0	2'482	3'572	144'751	843.9%
2043	2'511	0	0	2'511	0	2'511	3'572	150'834	875.0%
2044	2'540	0	0	2'540	0	2'540	3'572	156'945	906.3%
2045	2'568	0	0	2'568	0	2'568	3'572	163'085	937.8%
2046	2'597	0	0	2'597	0	2'597	3'572	169'254	969.4%
2047	2'626	0	0	2'626	0	2'626	3'572	175'451	1001.1%
2048	2'654	0	0	2'654	0	2'654	3'572	181'677	1033.0%
2049	2'683	0	0	2'683	0	2'683	3'572	187'931	1065.0%
2050	2'711	0	0	2'711	0	2'711	3'572	194'214	1097.2%
2051	2'740	0	0	2'740	0	2'740	3'572	200'526	1129.5%
<b>Total</b>	<b>113'374</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>113'374</b>	<b>0</b>	<b>113'374</b>	<b>107'152</b>	<b>200'526</b>	<b>1129.5%</b>

Tabla 3. Balance económico de la instalación de autoconsumo asociada a la propuesta 1. Payback time.

Solamente se tarda 2 años en amortizar la inversión inicial realizada (módulos e inversor de red). A partir de ahí, los ahorros económicos en la factura eléctrica van aumentando el valor asociado a la instalación, hasta alcanzar los valores anteriormente mencionados, para un rango temporal de 30 años.

Sin duda, en términos económicos, la instalación estudiada según el estudio económico realizado es viable, además de cumplir con las demandas del propietario de la industria, que fijaba un *payback time* de menor o igual a 5 años. Sin embargo, se debe realizar un estudio económico más completo, para poder calcular el *payback time* real de la instalación de autoconsumo.

- Análisis asociado a la reducción equivalente de emisiones de  $CO_2$  a la atmósfera por la cantidad de energía producida y autoconsumida.

En relación a la cantidad de emisiones de dióxido de carbono que se ha conseguido evitar, mediante el aprovechamiento de esta energía renovable, esta se cuantifica en un total de 466.78 toneladas.

En este sentido, siempre se asegura la viabilidad de la instalación, ya que contribuye a no emitir gases de efecto invernadero a la atmósfera ( $CO_2$ ) y, en definitiva, a no deteriorar el medio ambiente.

#### 5.1.4 Conclusiones obtenidas. Análisis de viabilidad.

Según los resultados asociados al balance energético de la instalación, la instalación es viable.

Esta posee una cobertura de la demanda correcta, además de desarrollar un correcto balance compensatorio entre energía vertida y energía consumida.

Sin embargo, como conclusión final obtenida, sería muy recomendable infradimensionar la instalación, en términos de potencia, para aumentar el aprovechamiento energético y disminuir el coste de la instalación y, en definitiva, hacer que la instalación sea más eficiente en términos energéticos.

En cuanto a rendimientos, la instalación posee unos rendimientos de operación suficientemente elevados como para considerarlos correctos y aceptables.

### 5.2 Propuesta 2 de instalación. Cálculos asociados a la conformación del array FV y conexión con el inversor de red. Resultados obtenidos. Análisis económico. Estudio de viabilidad.

Esta segunda propuesta de instalación teóricamente deberá poseer una potencia asignada de 46kW, según el dimensionado de potencia realizado en el apartado 3. El inversor de red finalmente utilizado posee una potencia nominal de salida de 50kW.

Esta es una propuesta que posee asociada más complejidad de cálculo, al requerir de un estudio matemático para distribuir correctamente los módulos en la cubierta, y evitar así pérdidas por sombreados. En este apartado, no se realiza dicho estudio.

En este caso, el array fotovoltaico se instala con una inclinación de  $40^\circ$  y un azimut de  $0^\circ$ , valores óptimos de instalación para el emplazamiento estudiado. Para ello, se requerirán de estructuras auxiliares que doten a los módulos dicha inclinación y orientación.

Por ello, esta instalación será más cara, a pesar de instalar menos paneles. El uso de estructuras auxiliares encarece el precio de la instalación. Sin embargo, se espera que con el dimensionado realizado, el *payback time* sea el deseado y la instalación desarrolle el desempeño estudiado y esperado.

#### 5.2.1 Procedimiento teórico y analítico seguido, para conformar el array FV y su conexión con el inversor de red.

El procedimiento seguido para conformar el array fotovoltaico, tanto teórico como analítico, se detalla en el apartado 4.2 del anexo textual VI. A continuación, se presenta un resumen de los resultados finales obtenidos:

- El array fotovoltaico estará compuesto por un total de 80 módulos. Por ello, la potencia final a instalar no será 46kW, si no 46.8kW. La razón por la que se ha tomado esta decisión se detalla en dicho apartado.

Se conformarán 5 strings de 16 módulos fotovoltaicos cada uno.

#### 5.2.2 Disposición del array FV sobre la superficie útil.

En cuanto al diseño asociado a la disposición de los módulos, en este caso no se ha diseñado en AutoCAD la disposición del campo FV sobre la cubierta, ni se proporciona un archivo AutoCAD en el que se diseñe la disposición de dicho campo sobre la cubierta, en base a resultados.

#### 5.2.3 Análisis del balance energético y económico de la instalación a partir de PVSyst.

*\* La configuración establecida asociada a los parámetros de entrada necesarios a introducir en PVSyst, para realizar la simulación de acorde a las características de la instalación planteada, se detalla en el apartado 2.2 del anexo textual VII.*

Tras introducir y configurar los parámetros de entrada, se realiza la simulación de la instalación de autoconsumo fotovoltaica propuesta a partir de PVSyst.

Los resultados más significativos que el software proporciona, tras realizar la simulación, son los siguientes:

*\* El reporte de la simulación se proporciona en el anexo digital IV. Posee el siguiente nombre: "Reporte - Simulación propuesta dos - 46.8kW".*

- Análisis del rendimiento y balance energético de la instalación.

La producción total anual del sistema fotovoltaico, con una proporción de rendimiento medio anual calculada igual a 0.855, es de 76.33MWh/año. La distribución energética del sistema es la siguiente:

Suponiendo la eficiencia de los módulos fotovoltaicos la especificada por el fabricante en condiciones STC (21.4%), se obtiene una energía total anual producida por el array de 87MWh. Debido a pérdidas por irradiancia, temperatura y *missmatch*, el array consigue producir trabajando en su PMP un total de 81.2MWh y. Tras las pérdidas en la conversión de CC a CA, asociados al rendimiento del inversor, este consigue proporcionar a la salida 76.3MWh.

De estos 76.3MWh proporcionados por el inversor a su salida, 61,91MWh son demandados por la industria, lo que supone una cobertura de la demanda del 81.14%.

En este caso, la cobertura de la demanda es mayor al caso anterior, ya que se produce menos energía fotovoltaica, al ser el dimensionado de potencia realizado menor, y se otorga la misma cantidad de energía a la industria. Sin embargo, el coste económico de la instalación es mayor.

De los 61.91MWh demandados, 51.98MWh son vertidos a la red. Esto supone un vertido a red del 83.96%.

En cuanto a la energía consumida de la red, la simulación la cuantifica en 37.6MWh.

El rendimiento general de la instalación se cuantifica en un 85.52%. Un valor suficientemente aceptable, aunque menor al de la propuesta anterior.

En cuanto a si estos resultados confirman la viabilidad de la instalación, tal y como se explica en el apartado 3, la realidad es que sí. Si bien es cierto que no existen diferencias significativas con respecto a los resultados obtenidos para la propuesta anterior, los valores obtenidos son suficientemente buenos como para aceptar la propuesta de la instalación. Como punto en contra a resaltar, indicar el mayor coste económico asociado a la instalación, que posteriormente se analiza.

Por otra parte, como punto a favor de la instalación, en este caso el vertido de energía a red también es mayor a la cantidad de energía comprada de la red eléctrica. De esta forma, se asegura que toda la energía consumida de la red vaya a ser compensada económicamente con la energía vertida a la red, notándose en una reducción significativa en el coste económico de la factura de la luz.

- Análisis económico de la instalación.

El coste total de la instalación, asociado a paneles fotovoltaicos, estructuras auxiliares asociadas, e inversor de red, incluyendo impuestos, es de 24343.08 euros.

El *payback time* o tiempo de recuperación de la inversión es igual a 3.4 años, aunque este aumenta si añadimos todos los costes restantes. Para una duración de 20 años, supuesta vida útil de la instalación, el *Net Present Value* o Valor Actual Neto (VAN) de la instalación llega a alcanzar los 148019.59 euros, de forma que se obtiene una recuperación de la inversión igual al 608.1%.

Los valores asociados al balance económico de la instalación se pueden observar y analizar a partir de la Tabla 4.

	Electricity sale	Run. costs	Deprec. allow.	Taxable income	Taxes	After-tax profit	Self-cons. saving	Cumul. profit	% amorti.
2022	3'639	0	0	3'639	0	3'639	3'555	7'194	29.6%
2023	3'661	0	0	3'661	0	3'661	3'555	14'409	59.2%
2024	3'683	0	0	3'683	0	3'683	3'555	21'646	88.9%
2025	3'704	0	0	3'704	0	3'704	3'555	28'905	118.7%
2026	3'726	0	0	3'726	0	3'726	3'555	36'186	148.7%
2027	3'748	0	0	3'748	0	3'748	3'555	43'489	178.6%
2028	3'770	0	0	3'770	0	3'770	3'555	50'813	208.7%
2029	3'792	0	0	3'792	0	3'792	3'555	58'160	238.9%
2030	3'814	0	0	3'814	0	3'814	3'555	65'528	269.2%
2031	3'835	0	0	3'835	0	3'835	3'555	72'918	299.5%
2032	3'857	0	0	3'857	0	3'857	3'555	80'330	330.0%
2033	3'879	0	0	3'879	0	3'879	3'555	87'764	360.5%
2034	3'901	0	0	3'901	0	3'901	3'555	95'219	391.2%
2035	3'923	0	0	3'923	0	3'923	3'555	102'697	421.9%
2036	3'945	0	0	3'945	0	3'945	3'555	110'196	452.7%
2037	3'966	0	0	3'966	0	3'966	3'555	117'717	483.6%
2038	3'988	0	0	3'988	0	3'988	3'555	125'260	514.6%
2039	4'010	0	0	4'010	0	4'010	3'555	132'825	545.6%
2040	4'032	0	0	4'032	0	4'032	3'555	140'411	576.8%
2041	4'054	0	0	4'054	0	4'054	3'555	148'020	608.1%
<b>Total</b>	<b>76'926</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>76'926</b>	<b>0</b>	<b>76'926</b>	<b>71'094</b>	<b>148'020</b>	<b>608.1%</b>

Tabla 4. Balance económico de la instalación de autoconsumo asociada a la propuesta 2. Payback time.

En cuanto a la viabilidad de esta instalación en términos económicos, en comparación con la propuesta anterior, ya no es tan viable. Solamente para recuperar la inversión asociada a módulos e inversor se tarda más de 3 años, por lo que incluyendo los demás costes asociados la instalación puede superar los 5 años de *payback time*, que no cumpliría con los deseos del propietario de la industria.

- Análisis asociado a la reducción equivalente de emisiones de  $CO_2$  a la atmósfera por la cantidad de energía producida y autoconsumida.

En relación a la cantidad de emisiones de dióxido de carbono que se ha conseguido evitar, mediante el aprovechamiento de esta energía renovable, esta se cuantifica en un total de 446.69 toneladas, una menor cantidad con respecto a la otra propuesta.

En este sentido, siempre se asegura la viabilidad de la instalación, ya que contribuye a no emitir gases de efecto invernadero a la atmósfera ( $CO_2$ ) y, en definitiva, a no deteriorar el medio ambiente.

#### 5.2.4 Conclusiones obtenidas. Análisis de viabilidad.

Según los resultados obtenidos a partir de la simulación, en términos económicos, no se puede confirmar la viabilidad de la instalación. Sería necesario realizar un análisis económico más completo para verificar si realmente se consigue amortizar la inversión inicial realizada en 5 años o menos.

Por otra parte, según los resultados asociados al balance energético de la instalación, la instalación es viable. En general, se obtienen mejores resultados en términos de vertido a red y aprovechamiento energético, aunque el rendimiento medio anual de la instalación es menor y

el coste económico mayor. Se sigue manteniendo el equilibrio compensatorio entre la energía vertida y la energía comprada de la red, lo que asegura la máxima compensación económica en la factura de la luz.

Estudiando el rendimiento desarrollado, la instalación posee unos rendimientos de operación suficientemente elevados como para considerarlos correctos y aceptables, aunque se necesita resaltar que son menores a los desarrollados por la propuesta de instalación anteriormente analizada.

Para finalizar, en este caso, también sería muy recomendable infradimensionar la instalación en términos de potencia, para aumentar el aprovechamiento energético, además de reducir en los costes de la instalación y poder reducir a su vez el *payback time*.

## CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURO

### *Apartado 1. Conclusiones.*

Las conclusiones que se obtienen tras realizar este trabajo de fin de grado, se dividen en diferentes partes, según los diferentes ámbitos de estudio que se han trabajado y los diferentes análisis que se han planteado y desarrollado en este trabajo:

- En primer lugar, se comienza por presentar las conclusiones obtenidas en relación a la situación actual de la energía solar fotovoltaica, sus componentes asociados y su “presencia energética” tanto en el mundo como en España, en términos cuantitativos y legislativos.

Actualmente, según los estudios realizados en este trabajo, los componentes existentes y conformantes de una instalación de autoconsumo fotovoltaica poseen las características suficientes, tanto técnicas como económicas, para considerar su uso aceptable y considerar la realización de una instalación de autoconsumo a partir de los mismos viable.

En términos económicos, cabe resaltar que las células y los paneles fotovoltaicos han visto reducido su precio notablemente en las últimas dos décadas, haciendo viable su utilización. Otros componentes, como son las baterías, siguen teniendo actualmente precios elevados, que aumentan el *payback time* de la instalación, y que normalmente llevan a no contemplar su uso en instalaciones de autoconsumo cuya relevancia sea auxiliar, y no fundamental, aunque pueda aportar notablemente al desempeño de la instalación.

Sin embargo, se concluye que las baterías son componentes que, en la modalidad de autoconsumo con excedentes acogido a compensación, permiten maximizar los parámetros de aprovechamiento energético y cobertura de la demanda, generando así la máxima reducción en el coste de la factura eléctrica y del tiempo de recuperación de la inversión o *payback time*.

En relación a la situación actual de la energía solar fotovoltaica, esta es de constante crecimiento, tal y como se analiza y concluye en el apartado 6 del anexo textual I, en

términos de producción energética y de potencia instalada, tanto en el mundo como en España. Una de las razones es que cada vez es mayor la cantidad de gente que quiere beneficiarse de las prestaciones de esta energía, al darse cuenta de su viabilidad económica y legislativa. Otra de las razones es que es una energía cuya producción apenas genera perjuicio para el medio ambiente, siendo el único factor de contaminación posible la contaminación visual, además de aquella derivada del procesamiento de los materiales utilizados tanto en la producción como en el reciclaje de los mismos.

También, se concluye que, actualmente en España, la viabilidad legislativa de las instalaciones de autoconsumo es real, gracias al RD 244/2019, que representa la apertura del gobierno español, en términos legislativos, en cuanto a permitir aprovechar las prestaciones de una instalación de autoconsumo, para poder satisfacer su demanda energética y poder reducir el coste de su factura eléctrica, en términos económicos.

- En segundo lugar, se procede a presentar las conclusiones obtenidas tras utilizar el analizador de redes, para realizar mediciones reales en la fábrica, y conocer la demanda energética de la industria.

El analizador de redes es un instrumento de medición profesional y muy útil para este ámbito de aplicación. El fabricante otorga hojas de características asociadas en las que detalla todas sus formas de configuración y utilización, por lo que el proceso de aprendizaje no ha sido muy costoso, aunque ha requerido de tiempo y de trabajo, que se plasma en el anexo textual V.

A la hora de realizar una instalación de autoconsumo, si no se poseen datos de la demanda energética del consumidor (proporcionados habitualmente por la compañía eléctrica), utilizar esta instrumentación de medida se convierte en fundamental, ya que es la única fuente de información, además de aquella que se pudiera obtener mediante la realización un estudio de previsión de potencia, que permitiera cuantificar la demanda energética del consumidor. Con estos datos, se procedería a realizar el dimensionado de potencia de la instalación.

Es necesario realizar una correcta utilización y configuración del mismo, en base a indicaciones del fabricante, para poder obtener las medidas buscadas, y que sean veraces y precisas.

- En tercer lugar, se finaliza este apartado citando las conclusiones asociadas a los resultados obtenidos tras analizar las propuestas estudiadas.

En relación a las propuestas de instalación de autoconsumo planteadas, ambas propuestas se pueden considerar aceptables y viables, según los resultados obtenidos en el apartado 5 de la sección de desarrollo de esta memoria.

Ambas propuestas se han dimensionado de forma que el aprovechamiento energético supere el 75% y que la cantidad de energía vertida a la red superase la cantidad comprada de la red, por lo que se pueden considerar eficientes en términos energéticos. Sin embargo, tal y como se menciona en el apartado 5, se concluye que un infradimensionado de la potencia de la instalación, para ambas propuestas, hubiera

permitido aumentar dicho aprovechamiento y reducir el *payback time*, mejorando la viabilidad energética y económica de la instalación.

Por otra parte, tras realizar las simulaciones con PVSyst y tras utilizar la herramienta Excel y analizar los resultados obtenidos, también se ha concluido que, para la modalidad de autoconsumo elegida para ambas propuestas de instalación, una buena solución es utilizar un sistema de almacenamiento por baterías. De esta forma, se maximiza el aprovechamiento energético de la instalación y la reducción en la factura eléctrica. Si bien es cierto que en un principio se encarecería el coste inicial de la inversión, con el infradimensionado de potencia mencionado anteriormente y pactando un correcto precio de vertido a red con la empresa comercializadora, se podrían mantener tiempos recuperación de la inversión viables, menores a 5 años.

En términos legislativos, se concluye que la modalidad de autoconsumo con excedentes acogida a compensación es la más adecuada según las demandas del cliente, y además es completamente viable para las propuestas estudiadas, según se demuestra en el apartado 7 del anexo textual III.

## *Apartado 2. Líneas de trabajo futuro.*

En este apartado de líneas de trabajo futuro, se pretende analizar aquellos aspectos de mejora asociados a la realización de este trabajo fin de grado.

En este trabajo, se han planteado 2 propuestas de instalación de autoconsumo diferentes, que se concebían inicialmente como las más viables, teniendo en cuenta las características de la industria y las demandas del propietario de la misma. Tras analizar los resultados, se ha concluido que, para la modalidad de autoconsumo escogida, incluir un sistema de almacenamiento por baterías aumenta en gran medida el rendimiento energético de la instalación. En este sentido, convendría estudiar si, además de obtener una mejora en dicho rendimiento (analizando dicha mejora), se obtiene una mejora en términos económicos, asociados a recuperación de la inversión realizada. Sería bueno realizar una nueva propuesta de instalación, en la que se calculara de forma más precisa el dimensionado de potencia de la instalación y que, además, se utilizaran baterías, dimensionándolas correctamente.

Otra línea de trabajo futura, es la realización de un estudio económico mucho más preciso, en el que se contemplaran la totalidad de costes asociados a la instalación de autoconsumo, y se estudiara la viabilidad económica de la instalación, a partir de PVSyst, con estos datos. A su vez, un estudio asociado a la infraestructura eléctrica de la instalación, en el que se realizaran todos los cálculos eléctricos necesarios para conformar la instalación eléctrica requerida, ayudaría a completar el estudio relacionado con la instalación de autoconsumo fotovoltaica.

## REFERENCIAS

1. ONU Objetivos de Desarrollo Sostenible. Available online: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/> (accessed on Sep 9, 2021).
2. Wikipedia Energía solar fotovoltaica. Available online: [https://es.wikipedia.org/wiki/Energía\\_solar\\_fotovoltaica#cite\\_note-22](https://es.wikipedia.org/wiki/Energía_solar_fotovoltaica#cite_note-22) (accessed on Aug 19, 2021).
3. Wikipedia Célula fotoeléctrica. Available online: [https://es.wikipedia.org/wiki/Célula\\_fotoeléctrica](https://es.wikipedia.org/wiki/Célula_fotoeléctrica) (accessed on Aug 20, 2021).
4. Wikipedia Energía solar fotovoltaica. Available online: [https://es.wikipedia.org/wiki/Energía\\_solar\\_fotovoltaica](https://es.wikipedia.org/wiki/Energía_solar_fotovoltaica) (accessed on Aug 20, 2021).
5. Academia de Energía Solar Tipos de instalación fotovoltaica. Available online: <https://academiaenergiasolar.com/courses/864549/lectures/15693594> (accessed on Aug 20, 2021).
6. DIREENERGY ¿Qué instalaciones solares de autoconsumo existen? Available online: <https://www.direenergy.net/index.php/blog/tipos-instalaciones-solares/> (accessed on Sep 8, 2021).
7. Universidad de Jaén El efecto fotovoltaico. Available online: [http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home\\_main\\_frame/03\\_celula/01\\_basico/3\\_celula\\_03.htm](http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/03_celula/01_basico/3_celula_03.htm) (accessed on Aug 20, 2021).
8. López, J.C. Solo el arseniuro de galio puede intimidar al silicio: así es el semiconductor que está cambiando las reglas del juego. Available online: <https://www.xataka.com/investigacion/solo-arseniuro-galio-puede-intimidarse-al-silicio-asi-semiconductor-que-esta-cambiando-reglas-juego> (accessed on Aug 20, 2021).
9. Wikipedia Silicio. Available online: <https://es.wikipedia.org/wiki/Silicio> (accessed on Aug 20, 2021).
10. Universidad de Jaén Tecnología de fabricación de la célula solar. Available online: [http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home\\_main\\_frame/03\\_celula/01\\_basico/3\\_celula\\_05.htm](http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/03_celula/01_basico/3_celula_05.htm) (accessed on Sep 3, 2021).
11. Energía solar Célula solar de película fina. Available online: <https://solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/elementos/panel-fotovoltaico/celula-fotovoltaica/celula-solar-de-pelicula-fina> (accessed on Aug 20, 2021).
12. Academia de Energía Solar Clasificación de las células fotovoltaicas. Available online: <https://academiaenergiasolar.com/courses/864549/lectures/15693576> (accessed on Aug 20, 2021).
13. Universidad de Jaén El panel fotovoltaico. Available online: [http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home\\_main\\_frame/04\\_componen/01\\_generador/01\\_basico/4\\_gene\\_01.htm](http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/04_componen/01_generador/01_basico/4_gene_01.htm) (accessed on Aug 20, 2021).
14. Honsberg, C.B.; Bowden, S.G. Photovoltaics Education Website. Available online: <https://www.pveducation.org/> (accessed on Aug 20, 2021).
15. Academia de Energía Solar Tecnologías de módulos FV. Available online: <https://academiaenergiasolar.com/courses/864549/lectures/15693577> (accessed on Aug 20, 2021).
16. Academia de Energía Solar Asociación de módulos en serie y en paralelo. Available online: <https://academiaenergiasolar.com/courses/864549/lectures/15693580> (accessed on Sep 3, 2021).
17. Academia de Energía Solar Seguimiento MPPT. Available online: <https://academiaenergiasolar.com/courses/864549/lectures/15693570> (accessed on Aug 20, 2021).

- Aug 20, 2021).
18. Academia de Energía Solar Efecto de la temperatura y la altitud. Available online: <https://academiaenergiasolar.com/courses/864549/lectures/24653308> (accessed on Aug 20, 2021).
  19. SESLab; (TEC), T. de C.R. Inversores conectados a red: detalles. Available online: [http://seslab.org/fotovoltaico/14\\_inversores\\_conectados\\_a\\_red\\_detalle.html](http://seslab.org/fotovoltaico/14_inversores_conectados_a_red_detalle.html) (accessed on Sep 4, 2021).
  20. Academia de Energía Solar Clasificación y principales marcas comerciales. Available online: <https://academiaenergiasolar.com/courses/864549/lectures/15693569> (accessed on Aug 20, 2021).
  21. Enérgya-VM Tipos de inversores solares en función de su posibilidad de conexión a red eléctrica. Available online: <https://www.energyavm.es/inversores-solares-que-tipos-hay-y-como-funcionan/> (accessed on Aug 20, 2021).
  22. AutoSolar Energy Solutions SLU Tipología de inversores solares. Descripción. Available online: [https://www.youtube.com/watch?v=D\\_SKHAlbDFs](https://www.youtube.com/watch?v=D_SKHAlbDFs) (accessed on Aug 20, 2021).
  23. Universidad de Jaén El inversor fotovoltaico. Available online: [http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home\\_main\\_frame/04\\_componen/04\\_inversor/01\\_basico/4\\_inve\\_01.htm](http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/04_componen/04_inversor/01_basico/4_inve_01.htm) (accessed on Aug 20, 2021).
  24. Academia de Energía Solar Elementos de protección. Available online: <https://academiaenergiasolar.com/courses/training-solar-avanzado/lectures/32279320> (accessed on Aug 20, 2021).
  25. Universidad de Zaragoza Aparamenta. Available online: [https://moodle.unizar.es/add/pluginfile.php/2866349/mod\\_resource/content/4/aparamenta\\_bt.pdf](https://moodle.unizar.es/add/pluginfile.php/2866349/mod_resource/content/4/aparamenta_bt.pdf) (accessed on Aug 20, 2021).
  26. Google Maps Ubicación de la industria. Available online: <https://www.google.es/maps/place/Maderas+Bielsa/@40.3673572,-1.1543163,150m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0xd5e7415870f1557:0xb12257bdaaea2ce0!8m2!3d40.367356!4d-1.1543886?hl=es> (accessed on Sep 7, 2021).
  27. Wikipedia. Sectores económicos. Available online: [https://es.wikipedia.org/wiki/Sector\\_económico](https://es.wikipedia.org/wiki/Sector_económico) (accessed on Aug 27, 2021).
  28. Academia de Energía Solar Dimensionado de potencia FV 1. Available online: <https://academiaenergiasolar.com/courses/864549/lectures/24761852> (accessed on Aug 30, 2021).
  29. Academia de Energía Solar Dimensionado de potencia FV 2. Available online: <https://academiaenergiasolar.com/courses/864549/lectures/24761853> (accessed on Sep 7, 2021).
  30. Academia de Energía Solar Características del módulo FV-2. Available online: <https://academiaenergiasolar.com/courses/864549/lectures/15693579> (accessed on Aug 29, 2021).
  31. Academia de Energía Solar Seleccionar el inversor I. Available online: <https://academiaenergiasolar.com/courses/training-solar-avanzado/lectures/24653727> (accessed on Aug 30, 2021).
  32. Academia de Energía Solar Selección inversor y distribución de los módulos. Available online: <https://academiaenergiasolar.com/courses/864549/lectures/24761898> (accessed on Aug 30, 2021).