

***Facultad
de
Ciencias***

**ESTUDIO DE POSIBILIDADES DE
AUTOCONSUMO FOTOVOLTAICO EN
COMUNIDADES ENERGÉTICAS**
(Study of the possibilities of photovoltaic self-
supply in energetic communities)

Trabajo de Fin de Grado
para acceder al

GRADO EN FÍSICA

Autor: León Ruiz Posadas

Director: Jónatan Piedra Gómez

Co-Director: Pablo Castro Alonso

Septiembre - 2025

A mis amigas Laila y Marina, que no pudieron completar sus estudios.

Descansad en paz.

Índice

Resumen/abstract	1
1 Introducción	2
1.1 Motivación	2
1.2 Marco legislativo-administrativo en España	3
1.2.1 Origen y conceptos básicos	3
1.2.2 Modalidades y limitaciones del autoconsumo	3
1.2.3 Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC)	5
1.2.4 Tipos de comunidades energéticas	6
2 Desarrollo de comunidades energéticas en España en la actualidad	7
2.1 COMPTTEM Crevillent	7
2.2 Vilawatt	8
3 Energía fotovoltaica	8
3.1 Principios físicos de la energía solar	8
3.1.1 Fusión nuclear en las estrellas	8
3.1.2 Espectro de emisión solar	10
3.1.3 Modelo atómico de Bohr	11
3.1.4 Efecto fotoeléctrico	11
3.1.5 Teoría de bandas en sólidos cristalinos	12
3.1.6 Materiales semiconductores	14
3.1.7 Uniones p-n	15
3.1.8 Interacción de los semiconductores con la luz	16
3.1.9 Adaptaciones ópticas de las células fotovoltaicas	18
3.2 Paneles fotovoltaicos	19
3.2.1 Funcionamiento de la célula	19
3.3 Tecnología actual en el ámbito de la energía solar	20
3.3.1 Microrredes	21
3.3.2 Inversores	21

3.3.3	Almacenamiento energético	22
3.3.4	Plan de contingencia contra un apagón general de la red	23
4	Instalación y funcionamiento general	24
4.1	Características necesarias	24
4.2	Requisitos de conexión a la red eléctrica general	25
4.3	Esquemas de configuraciones posibles según instalaciones de genera- ción	26
5	Estudio de la Habana Vieja en Torrelavega	28
5.1	Proyecto base	28
5.2	Producción de energía prevista	29
5.2.1	Componentes y parámetros relevantes	29
5.2.2	Base de datos PGVIS-ERA5	30
5.2.3	Base de datos PGVIS-SARAH3	32
5.2.4	Comparación entre ambas bases y resultados	33
5.3	Disposición propuesta	34
5.3.1	Módulos fotovoltaicos	34
5.3.2	Inversores	36
5.3.3	Baterías	37
5.3.4	Otras valoraciones	38
5.4	Posibles complicaciones	39
6	Discusión	40
6.1	Plano tecnológico	40
6.2	Repercusiones medioambientales	41
6.3	Impacto económico	42
6.4	Consecuencias sociales	44
7	Conclusiones	45
	Referencias	46

Resumen

Partiendo de la incipiente figura de comunidad energética en la Comunidad Europea y en España, las recientes concesiones legales en cuanto a autoconsumo y los planes nacionales y europeos respecto a emisiones de carbono a medio y largo plazo, se ha retomado la idea de un proyecto real pausado y se han estudiado las posibilidades de implantación de figura de comunidad energética en la ciudad de Torrelavega. Se considera que la producción energética, aunque insuficiente para proporcionar autosuficiencia eléctrica, es considerable y representa una ayuda a tanto a la población como al objetivo de emisiones neutras de CO₂ a la atmósfera.

Palabras clave: comunidades energéticas, energía fotovoltaica, autoconsumo, irradiancia solar.

Abstract

On the basis of the emerging figure of energetic communities in the European Community and Spain, the most recent legal concessions regarding self-consumption and the national and European plans in relation to the carbon emissions in the short and long term, the founding idea of a paused project has been taken into account, along with the possibilities of the implantation of an energetic community in the city of Torrelavega. Regarding the energetic production, it is considered that, although insufficient for electric autonomy, is considerable and represents a step forward in lessening the CO₂ atmospheric emissions and improving the situation of the population.

Key words: energetic communities, photovoltaic energy, self-consumption, solar irradiation.

1 Introducción

1.1 Motivación

El objetivo central de este estudio es la evaluación del establecimiento de la integración de algunos de los últimos avances tecnológicos en la vida cotidiana como mejora de la calidad de vida y eficiencia, aliviando a su vez la carga energética y medioambiental del planeta. Como referencia local, se contempla el caso práctico de la ciudad de Torrelavega, uno de los municipios cántabros recipientes de una subvención que permitirá asentar las bases a raíz de instalaciones generadoras de autoconsumo en diversos edificios de índole público.

A fecha de redacción de esta memoria, tanto el proyecto para Torrelavega como otros muchos esparcidos por la provincia o incluso todo el país se encuentran paralizados; sin noticias sobre su avance o cancelación. Se espera poder despertar el interés no sólo del potencial que ofrecen las comunidades energéticas sino también por su desarrollo en diversas zonas de Cantabria.

Se pretende que, tanto la descentralización de la generación como la administración a pequeña escala de la corriente eléctrica suministrada los diversos hogares y pequeños comercios que formasen parte de esta comunidad, satisfagan la demanda energética de manera más eficiente, limpia y económicamente asequible.

Algunas ideas interesantes que derivan de la figura de la comunidad energética que la diferencian del autoconsumo individual y en parte del colectivo es la posibilidad de fomentar valores como la cooperación y efectuar diversos cambios: impulso de la integración social de sectores más económicamente vulnerables de la población, mayor cohesión social, apuesta por los negocios locales con una consecuente optimización relativa del reparto de la riqueza, mayor autosuficiencia económica y energética o reducción de la influencia de los monopolios eléctricos.

Asimismo, la apuesta por nuevas tecnologías más eficientes en consonancia con los recursos renovables reduciría las emisiones de carbono a la atmósfera, y podría reducir los efectos del cambio climático o ayudar a paliar los daños ya irreversibles. El inciso en los sistemas fotovoltaicos se debe tanto a sus recientes y constantes op-

timizaciones tecnológicas como al impacto de instalación y uso que ocasiona frente a otro tipo de fuentes renovables tales como la energía hidráulica, además del fomento legal del que consta desde hace años en el ámbito del autoconsumo, que sigue incrementando actualmente.

Otra consecuencia de la diversificación las fuentes energéticas y la inversión en energías renovables en España puede ser una menor dependencia económica de los recursos no renovables de países exportadores.

1.2 Marco legislativo-administrativo en España

1.2.1 Origen y conceptos básicos

La definición, clasificaciones y demás cuestiones relativas al autoconsumo energético en España fueron primeramente introducidas en el artículo 9 del Real Decreto 24/2013, posteriormente modificado en el Real Decreto 15/2018. En una de las últimas iteraciones de este término, pivotal para los proyectos planteados, el autoconsumo energético se define como “el consumo por parte de uno o varios consumidores de energía eléctrica proveniente de instalaciones de producción próximas a las de consumo y asociadas a los mismos” [1], constanding según la legislación española más actual, con diversas modalidades posteriormente explicadas en el siguiente apartado.

La figura de las comunidades energéticas aparecen formalmente definidas en dos directivas europeas de 2018 y 2019 respectivamente, que eventualmente se integraron en la legislación española, como un tipo particular de autoconsumo eléctrico colectivo, en el que la sostenibilidad medioambiental, el impulso de la economía local y la participación ciudadana se convierten en pilares integrales de su fundamento y desarrollo.

1.2.2 Modalidades y limitaciones del autoconsumo

Según la documentación legislativa más reciente de 2019, partiendo de la definición anteriormente establecida, se distinguen dos modalidades principales: autoconsumo energético sin excedentes y autoconsumo energético con excedentes. En el primero no existe ningún tipo de vertido energético a la red, y el segundo caso se ramifica en

dos opciones según la administración de sendos excesos de electricidad en la red, sean estos vendidos en el mercado libre eléctrico en base al precio medio horario establecido en el momento de la venta menos los costes de transporte (sin compensaciones) o se deriven a la empresa generadora contratada con el fin de disminuir el coste de la factura eléctrica (sujeto a compensaciones). En caso de que se desee optar por la modalidad de autoconsumo con excedentes sujeto a compensación, existen ciertos requisitos de obligado cumplimiento. Asimismo, el consumo puede establecerse como individual o colectivo dentro de cualquiera de sus modalidades, estando el primero vinculado únicamente a una persona física o jurídica y el segundo a más de una persona real o jurídica [2].

Particularmente, únicamente dentro de un autoconsumo colectivo es posible establecer un régimen sin excedentes acogido a compensación. En tal caso, los excedentes de un individuo serían destinados a través de la red interior a otro consumidor, y el primero recibiría una compensación en la próxima factura eléctrica.

Dada la posibilidad de autoconsumo colectivo, existen ciertas características que distinguen a la comunidad energética como un caso particular optativo dentro del mismo.

Por lo general, los generadores de energía de autoconsumo deben encontrarse a una distancia máxima de 500 m en proyección ortogonal en planta de la zona de consumo independientemente de la tensión, con la excepción de las instalaciones fotovoltaicas: la distancia se incrementa hasta 2000 m [2]. La redacción de dicha disposición se modifica ligeramente en el Artículo 5 del Real Decreto 29/2021, en el cual se aboga por el autoconsumo y las fuentes de energía renovables como medidas urgentes del ámbito energético.

De forma más reciente, se publicó el Real Decreto-ley 07/2025 con diferentes modificaciones respecto al sistema eléctrico del país. Las medidas más relevantes al tema que acontece son la creación de la figura física encargada de la gestión en el autoconsumo, el aumento de radio máximo de autoconsumo para energía fotovoltaica a 5000 m y la posibilidad de autoconsumo de dos modalidades distintas, una de ellas siendo individual sin excedentes, de manera simultánea. En la situación de un autoconsumo colectivo, toda las las personas partícipes han de acogerse al mismo

cambio [3].

1.2.3 Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC)

En consonancia con el Acuerdo de París de 2015 y los objetivos marcados por la Unión Europea en contraposición al avance del cambio climático, España presentó el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) enumerando el enfoque y propuestas a desarrollar para 2030. Asimismo se tiene en cuenta el objetivo a largo plazo de emisiones neutras de carbono en 2050 [4].

De acuerdo al documento, el 75 % de la emisiones de gases de efecto invernadero de este país se producen dentro del sector energético. La descarbonización del mismo se plantea como uno de los cuatro puntos clave dentro del PNIEC: se espera que en 2030 la producción eléctrica en España sea al menos en un 74 % de origen renovable. Algunas de las medidas propuestas para cumplir dicho fin incluyen promover el desarrollo del autoconsumo y favorecer el establecimiento de comunidades energéticas.

Dentro del apartado de dimensión de la descarbonización, se destacan las medidas 1 (Desarrollo de nuevas instalaciones de generación eléctrica con renovables), 4, (Desarrollo del autoconsumo con renovables y la generación distribuida) 13 (Comunidades energéticas locales) y 14 (Promoción del papel proactivo de la ciudadanía en la descarbonización) como las más relevantes para el tema que atañe [5]. Varios de los mecanismos de actuación correspondientes a sendas iniciativas inciden en el fomento de la participación ciudadana en proyectos de energía renovable e impulso del autoconsumo, especialmente en sectores vulnerables, y elaboración de manuales para su implementación. Se abordan objetivos específicos tales como la lucha contra la pobreza energética o el uso del autoconsumo colectivo como punto de partida para el desarrollo de comunidades energéticas locales.

Éstas últimas emplean las definiciones según las directivas de la UE, distinguiendo entre comunidad de energías renovables y comunidad ciudadana de energía. Se adopta el término paraguas “comunidades energéticas locales” para abarcar ambas. Los mecanismos de actuación para las comunidades energéticas locales se resumen en la creación de un marco legal específico acorde, una mayor facilidad en cuanto tra-

mitación para la ciudadanía, promoción de proyectos y programas de formación. Se designa como organismos responsables de esta medida al MITECO (Ministerio para la Transición Ecológica) y el IDAE (Instituto para la diversificación y Administración de la Energía) [6].

1.2.4 Tipos de comunidades energéticas

Dada la posibilidad de autoconsumo colectivo, existen ciertas características que distinguen a la comunidad energética como un caso particular dentro del mismo.

La comunidad energética de energías renovables se entiende como una entidad jurídica que se base en la participación abierta y voluntaria, sea autónoma y esté efectivamente controlada por socios o miembros que están situados en las proximidades de los proyectos de energías renovables que sean propiedad de dicha entidad jurídica y que ésta haya desarrollado; cuyos socios o miembros sean personas físicas, pymes o autoridades locales, incluidos los municipios y cuya finalidad primordial sea proporcionar beneficios medioambientales, económicos o sociales a sus socios o miembros o a las zonas locales donde opera, en lugar de ganancias financieras [7].

Por otro lado, una comunidad ciudadana de energía es definida como una entidad jurídica que se basa en la participación voluntaria y abierta, y cuyo control efectivo lo ejercen socios o miembros que sean personas físicas, autoridades locales, incluidos los municipios, o pequeñas empresas, cuyo objetivo principal consiste en ofrecer beneficios medioambientales, económicos o sociales a sus miembros o socios o a la localidad en la que desarrolla su actividad, más que generar una rentabilidad financiera, y participa en la generación, incluida la procedente de fuentes renovables, la distribución, el suministro, el consumo, la agregación, el almacenamiento de energía, la prestación de servicios de eficiencia energética o, la prestación de servicios de recarga para vehículos eléctricos o de otros servicios energéticos a sus miembros o socios [8].

Como se indicó previamente, el término “comunidades energéticas locales” representa ambas posibilidades. Las guías redactadas por el IDAE referentes a las comunidades energéticas por lo general emplean dicho término y contemplan una sinergia de las características asociadas a cada definición.

2 Desarrollo de comunidades energéticas en España en la actualidad

Tal como se puede observar según fuentes del IDAE, gran parte de las propuestas planteadas en las diferentes Comunidades Autónomas están pendientes de aceptación e implementación. El concepto y desarrollo de las comunidades energéticas es todavía incipiente en España, pero se pueden enumerar algunos ejemplos fructíferos con una trayectoria de varios años de actuación.

En ambos casos presentados, se destaca el empleo de energía solar fotovoltaica como fuente principal y pilar base en el crecimiento, aprovechando las recientes concesiones legislativas.

2.1 COMPTTEM Crevillent

La primera comunidad energética de España se encuentra en el municipio de Crevillent, establecida formalmente en 2019 [\[9\]](#).

Sus orígenes se remontan a 1925, con la fundación de la Cooperativa Eléctrica San Francisco de Asís. El objetivo principal era electrificar la industria textil, y posteriormente se comenzó a suministrar electricidad a la población. En tiempos más actuales, con el crecimiento de la producción, la misma pasó a ser de origen completamente renovable, basada en energía fotovoltaica y minihidráulica. La cooperativa es hoy en día un conglomerado empresarial bajo el nombre de Grupo Enercoop.

Esta línea de desarrollo, en conjunto con los recientes cambios legislativos anteriormente mentados, permitió la fundación de una comunidad ciudadana de energía renovable en conjunto con el municipio de Crevillent, la Generalitat Valenciana y el IDAE: el proyecto COMPTTEM (Comunidad para la Transición Energética Municipal).

La primera célula de autoconsumo colectivo establecida proporciona una energía anual de $1.8 \cdot 10^5$ kWh, suficiente para abastecer el 50 % de las necesidades energéticas de la población vecina (65 viviendas con 250 habitantes aproximadamente). Tras este proyecto piloto, la cantidad de células no sólo ha aumentado sino que la eficiencia, el almacenamiento y la integración con Crevillent ha sido mejorada. El 95 % de la

población es miembro y participante activo en la cooperativa. Además, existen diversas iniciativas municipales que promueven la divulgación energética a la ciudadanía.

Con el objetivo de abarcar la totalidad del municipio de Crevillent con una potencia en servicio de 5000 kW para 2030, la comunidad energética sigue en crecimiento y supone un ejemplo para el desarrollo de otras comunidades energéticas en el resto de España [10].

2.2 Vilawatt

Vilawatt nace de una iniciativa de la Unión Europea con el fin de que las ciudades adheridas avancen en la implantación de proyectos energéticos sostenibles. La problemática que conlleva el cambio climático y las preocupaciones a escala local del municipio impulsaron la creación del proyecto, financiado por la UE en 2016 [11].

Algunas de las medidas implantadas incluyen un suministro energético de origen 100 % renovable, principalmente de origen fotovoltaico; rehabilitación energética integral de viviendas, creación de una moneda local o divulgación energética a la población.

La administración es pública-privada-ciudadana, y actualmente se está promoviendo la formación de comunidades energéticas circundantes con el fin de verter los excedentes de energía eléctrica, que por el momento, son vendidos a través de la empresa *Factor Energía* [12].

3 Energía fotovoltaica

3.1 Principios físicos de la energía solar

3.1.1 Fusión nuclear en las estrellas

Durante la vida de una estrella, se da un equilibrio entre la fuerza gravitatoria y las reacciones termonucleares, evitando que ésta colapse.

La estabilidad de un núcleo atómico viene estudiada de forma semi-empírica por el modelo de la gota; en el que se contemplan características como el volumen, la

superficie, la repulsión de Coulomb, la asimetría en las capas de nucleones, el emparejamiento o energía de correlación entre neutrones y protones. Según el signo resultante del valor de estas adiciones, se puede establecer si el núcleo es estable o se desintegrará [13].

Según la energía de enlace de los nucleones de diferentes átomos, tanto la fusión de hidrógeno y otros elementos ligeros como la fisión de elementos más pesados liberan energía. Sin embargo, al estar las estrellas formadas principalmente por hidrógeno y helio, su fuente energética principal es la primera. Los dos mecanismos base son la cadena de protones y el ciclo CNO [13].

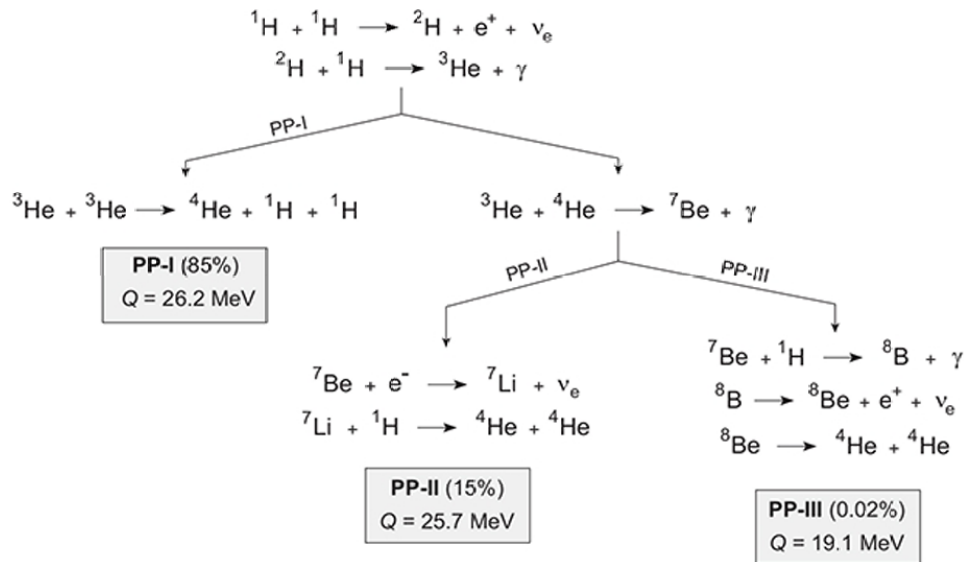


Figura 1: Esquema de la fusión de la cadena protón-protón, junto al porcentaje de contribución y la energía generada. FUENTE: *Stars and Stellar Processes*.

La cadena de protones inicial, descrita gráficamente en la Fig. 1 se ramifica en tres distintas, según si el helio se fusiona en berilio o no y las reacciones consecuentes. La cadena I aporta la mayor parte de energía de entre las tres [14].

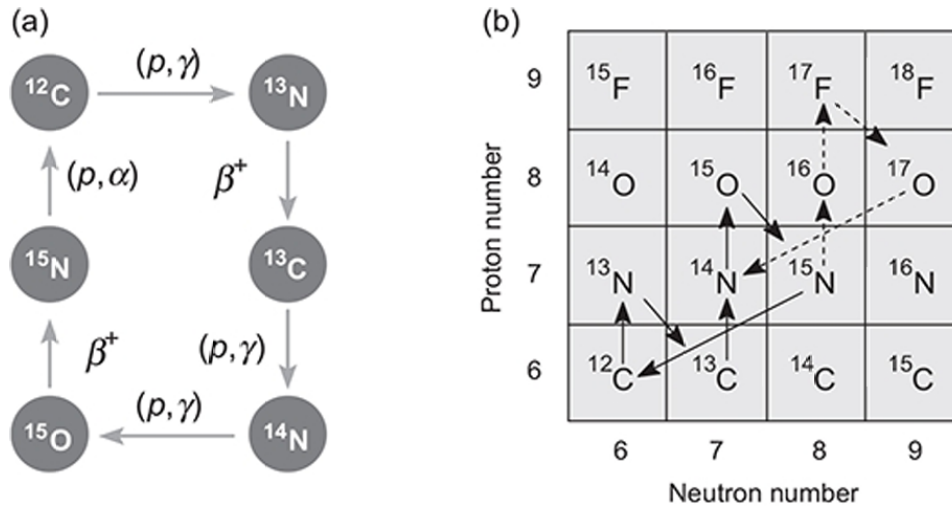


Figura 2: Ciclo CNO base (a) y variante con flúor (b). FUENTE: *Stars and Stellar Processes*.

EL ciclo CNO (carbono-nitrógeno-oxígeno) alterna isótopos del carbono y nitrógeno principalmente, existiendo la posibilidad de fusión del flúor, con las emisiones correspondientes de partículas beta o gamma según el punto del ciclo. Asimismo, cualquiera de los isótopos del ciclo principal puede servir como catalizador en la síntesis de helio-4 a partir de 4 protones [14]. Para que en la estrella se empiecen a producir estas reacciones, evidentemente es necesario que haya sintetizado dichos elementos previamente.

La predominancia de cualquiera de los dos procesos depende fuertemente de la temperatura del centro de la estrella, especialmente el ciclo CNO, lo que lo convierte en el procedimiento más eficiente en estrellas pesadas.

Ambas variantes aportan energía al Sol, correspondiendo la mayor parte a la cadena de protones por el momento [14].

3.1.2 Espectro de emisión solar

Cualquier cuerpo, por estar a una temperatura superior al 0 absoluto, emite radiación térmica. Las estrellas se consideran emisores casi perfectos, por lo que el empleo del modelo de cuerpo negro resulta bastante aproximado en su estudio.

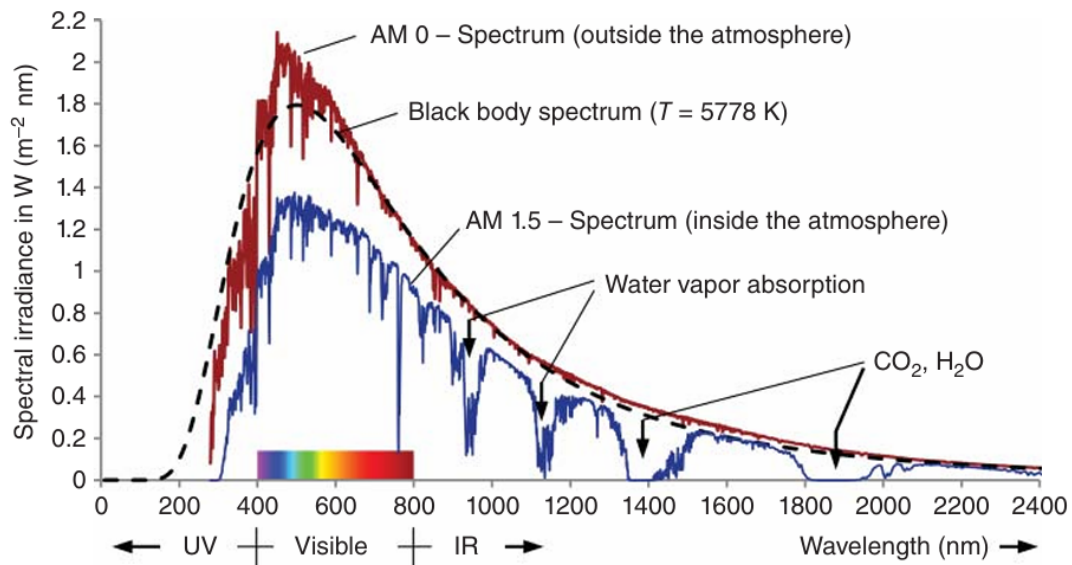


Figura 3: Irradiancia emitida por el Sol antes y tras atravesar la atmósfera, representada respecto a la longitud de onda. FUENTE: *Photovoltaics - Fundamentals, Technology and Practice*.

Dada la temperatura superficial del Sol de 5778 K, su espectro de emisión alcanza un máximo en torno a $\lambda_{max} = 500 \text{ nm}$ según la ley de Wien [15], haciendo que la curva se centre en el rango visible como se aprecia en la Fig.3, abarcando de manera considerable los rangos infrarrojo y en menor medida ultravioleta.

3.1.3 Modelo atómico de Bohr

Según el tercer postulado del átomo de Bohr, los electrones se mantienen estables en sus órbitas permitidas sin emitir energía en forma de radiación electromagnética a pesar de su aceleración. Sin embargo, el cuarto establece que, para trasladarse entre estados energéticos, un electrón emite o absorbe radiación electromagnética de frecuencia igual a la diferencia energética dividida entre la constante de Planck [16].

3.1.4 Efecto fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico es una de las instancias en las que se manifiesta el comportamiento corpuscular de la luz, mediante el cual un material emite electrones desde su superficie al ser ésta iluminada.

La ligadura al núcleo atómico de los electrones puede ser sobrepasada siempre

y cuando el fotón incidente aporte una energía mínima o función de trabajo, que se da a una frecuencia umbral distinta para cada material bajo la cual no se produce fotocorriente. Por ejemplo, en el caso del silicio la función de trabajo es de 4.8 eV, o una longitud de onda mínima dentro del rango ultravioleta de 258.3 nm. Esta función de trabajo se define también en los términos anteriores de la frecuencia del fotón multiplicada por la constante de Planck [17].

3.1.5 Teoría de bandas en sólidos cristalinos

En un modelo algo más avanzado que el de electrones libres en cristales, sin descartar enteramente la información que éste proporciona, se busca explicar las drásticas diferencias experimentales entre materiales conductores o aislantes, entre otros aspectos. Para ello es menester considerar la periodicidad de las celdas en el cristal. Es aquí donde se empieza a hablar de bandas de energía. Según el llenado de estas bandas, el material se comportará de una forma u otra. No sólo eso, sino también hay que considerar la magnitud del espacio o *gap* de energía entre sendas bandas [18].

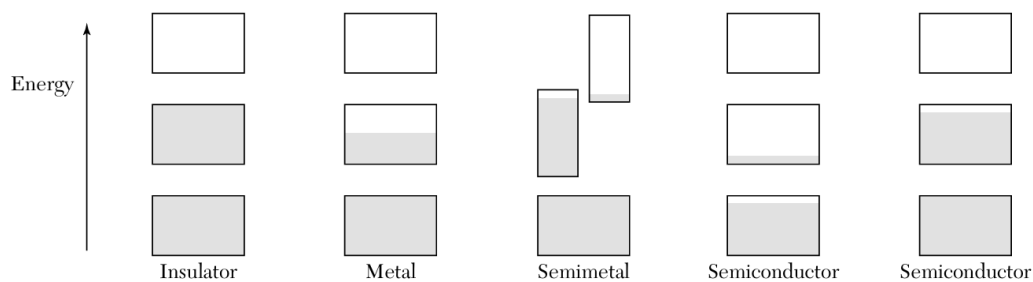


Figura 4: Llenado de bandas con electrones según el tipo de material. FUENTE: *Introduction to Solid State Physics*.

El siguiente paso tras el modelo de electrones libres es el de electrones cuasi-libres, donde se considera un potencial periódico asociado a los iones de la red cristalina. Las ondas estacionarias que cumplen con la condición de difracción de Bragg para el vector de onda se componen de dos ondas viajeras que se desplazan en la misma dirección pero sentidos opuestos.

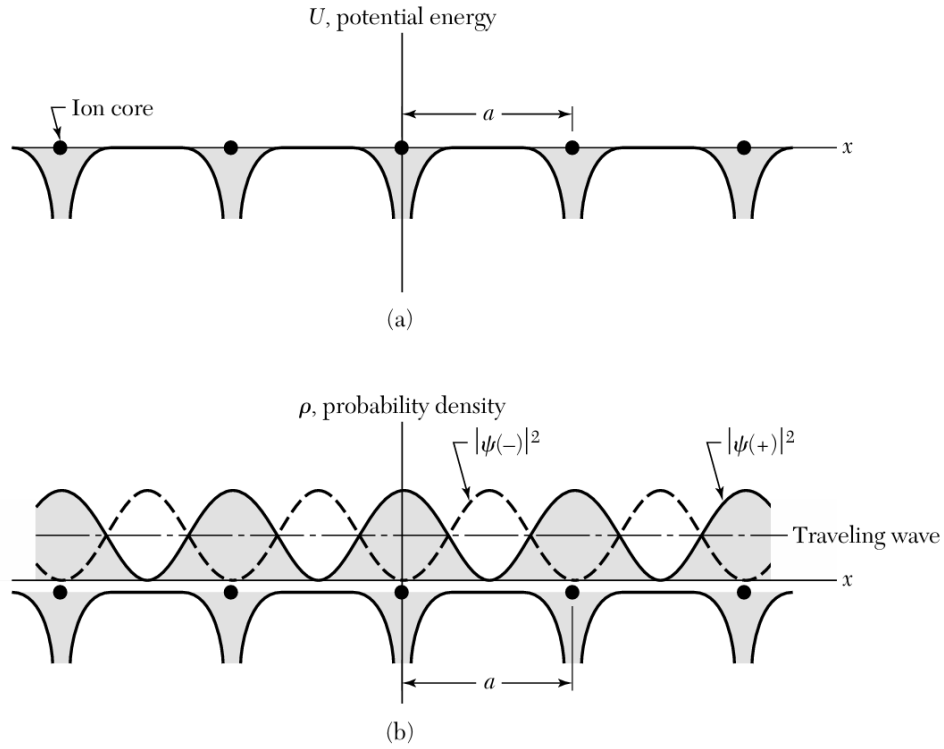


Figura 5: (a) Potencial de energía en una cadena unidimensional. (b) Densidad de probabilidad para las dos funciones que componen la onda estacionaria en la misma cadena unidimensional. FUENTE: *Introduction to Solid State Physics*.

Las densidades de probabilidad de las funciones de onda de los electrones representadas en la fig. 5 aumentan en el caso de $\psi(-)$ o disminuyen para $\psi(+)$ la energía total del sistema. La diferencia de energía entre estos dos estados es la del *gap*, E_g [18].

Al hacer que dichas funciones satisfagan el teorema de Bloch, considerando los valores de $\vec{k}$ en los límites de la primera zona de Brillouin y aplicando el modelo de Kronig-Penney de un potencial cuadrado periódico, se restringen las soluciones posibles y comienzan a aparecer los *gaps* entre las bandas permitidas. Es posible generalizar la expresión para cualquier valor permitido de $\vec{k}$. En cada banda hay dos orbitales por cada celda primitiva en la red, contando con los dos posibles valores para el *spin* [18].

Las bandas completamente llenas no contribuyen a la conductividad eléctrica [19]. Éste es el caso de los aislantes, que se caracterizan por una energía del *gap* muy alta que los electrones no pueden alcanzar a temperatura ambiente. Los metales, en

su estado fundamental, presentan al menos una banda de conducción parcialmente llena, y los materiales semiconductores cuentan con una energía del *gap* no muy alta que permite el salto de electrones de la banda de valencia a la banda de conducción a una temperatura superior a 0 K. En el cero absoluto, se comportan como aislantes.

La excitación de un electrón a la banda de conducción deja un hueco de misma carga pero con signo opuesto y un vector de onda total distinto de 0 en la banda de valencia (o banda llena) y otro igual pero de sentido opuesto en la de conducción, lo cual contribuye a la conductividad intrínseca del material [20].

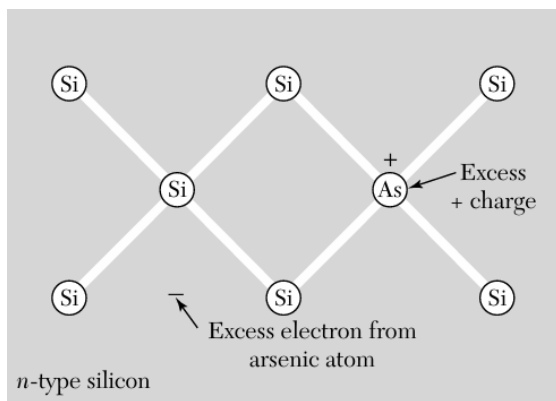
3.1.6 Materiales semiconductores

Una diferencia importante entre semiconductores y metales es que la conductividad de los primeros aumenta con la temperatura. Además, si el *gap* es lo suficientemente pequeño, se produce el fenómeno de fotoconductividad [21].

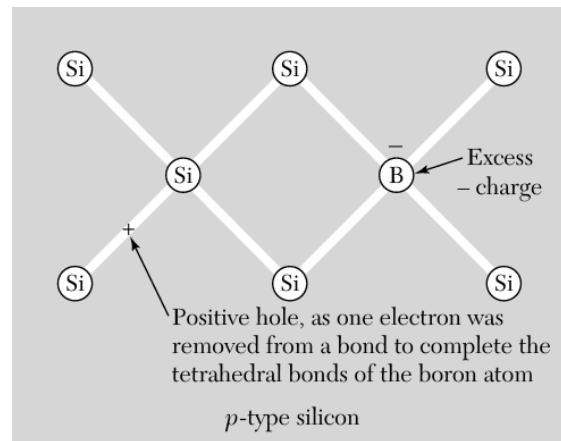
En un semiconductor, la masa de un electrón no se corresponde siempre con la estándar, sino que aplicando la Segunda Ley de Newton se encuentra que el valor de la masa puede variar según la dependencia de la energía con k y pasa de ser un escalar a un tensor. La masa efectiva se relaciona también con la anchura de las bandas, de forma que una masa efectiva mucho mayor que la habitual para el electrón implica bandas que no se solapan entre sí [22].

Se llaman semiconductores intrínsecos aquellos que carecen de impurezas y cuyo número de electrones y huecos es el mismo. En una red cristalina como la del silicio o el germanio, cada átomo forma 4 enlaces covalentes. Si se sustituye un átomo de la red por uno de valencia 5, por ejemplo el fósforo, quedaría un electrón libre que pasaría a la banda de conducción, por lo que se considera una impureza donante. Este tipo de semiconductores se denominan de tipo n, y los portadores de carga mayoritarios son los electrones.

Si, por el contrario, el átomo que pasa a ocupar un lugar en la red cristalina tiene valencia 3 como el boro, requieren un electrón de la banda de valencia del silicio para poder formar un cuarto enlace covalente, creando un hueco en la misma. Estos dopantes son los aceptores, y el semiconductor con esas impurezas es de tipo p. Los portadores de carga principales pasan a ser los huecos [22].



(a)



(b)

Figura 6: Red cristalina de silicio dopada con arsénico (a) y boro (b), resultando en un semiconductor de tipo n y otro de tipo p. FUENTE: *Introduction to Solid State Physics*.

Cuando las impurezas contribuyen con una cantidad significativa de portadores de carga, los semiconductores se consideran extrínsecos.

3.1.7 Uniones p-n

Una unión p-n es un cristal semiconductor en el que el tipo de impurezas, aceptoras o donantes, varían únicamente a lo largo de un eje y en una región concreta. La diferencia de densidad de carga genera una diferencia de potencial, y la zona de heterogeneidad se conoce como región de agotamiento o de unión [23].

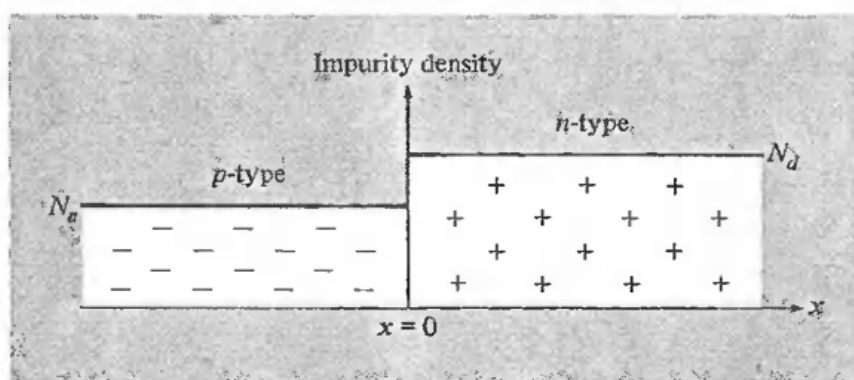


Figura 7: Diagrama de una unión p-n, donde la región de agotamiento se ubica en $x = 0$. FUENTE: *Solid State Physics*.

Se puede aplicar un voltaje externo en dos direcciones según la ubicación de la

concentración de cargas y la de huecos: en el mismo sentido que el potencial del cristal o en el reverso.

Para el caso reverso, como se observa en la fig. 8, existe una corriente mínima debido al efecto de la temperatura, que permite que los electrones salten de la banda de valencia a la de conducción. Si, por el contrario, se aplica el voltaje directamente, tanto electrones como huecos pueden circular libremente [24].

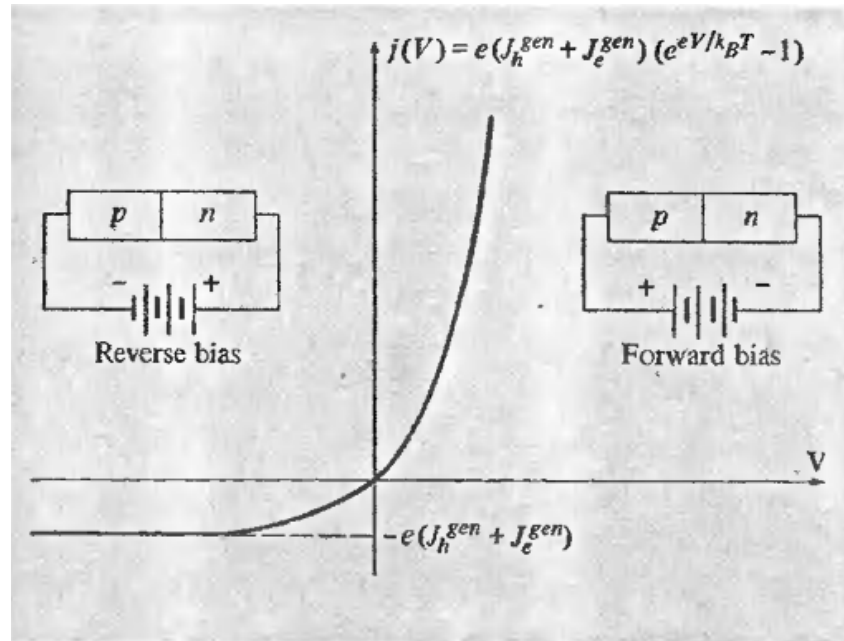


Figura 8: Circulación de corriente según la diferencia de tensión aplicada. FUENTE: *Solid State Physics*.

El resultado es un dispositivo que permite la circulación de la corriente eléctrica en un único sentido, es decir, un diodo.

3.1.8 Interacción de los semiconductores con la luz

La incidencia de fotones con una energía mayor a la del *gap* permite el salto de electrones de la banda de valencia a la banda de conducción. La energía recibida en la superficie decae exponencialmente según la profundidad y el coeficiente de absorción propio de cada material. Dicho valor es consecuencia del tipo de *gap* [25].

Si el máximo de la banda de valencia y el mínimo de la banda de conducción tienen el mismo momento cristalino proporcional a $\vec{k}$, el *gap* es directo y la interacción se produce sin mayor inconveniencia. Sin embargo, si la diferencia energética entre

bandas se produce con diferentes valores de $\vec{k}$, como es el caso del silicio, se requiere la mediación de un fonón de la red que aporte el momento necesario para completar el salto electrónico. Dado que en un semiconductor indirecto el electrón presenta una probabilidad algo menor de incorporación a la banda de conducción debido a esta limitación, el coeficiente de absorción es más bajo, como se puede observar en la fig. 9 [25].

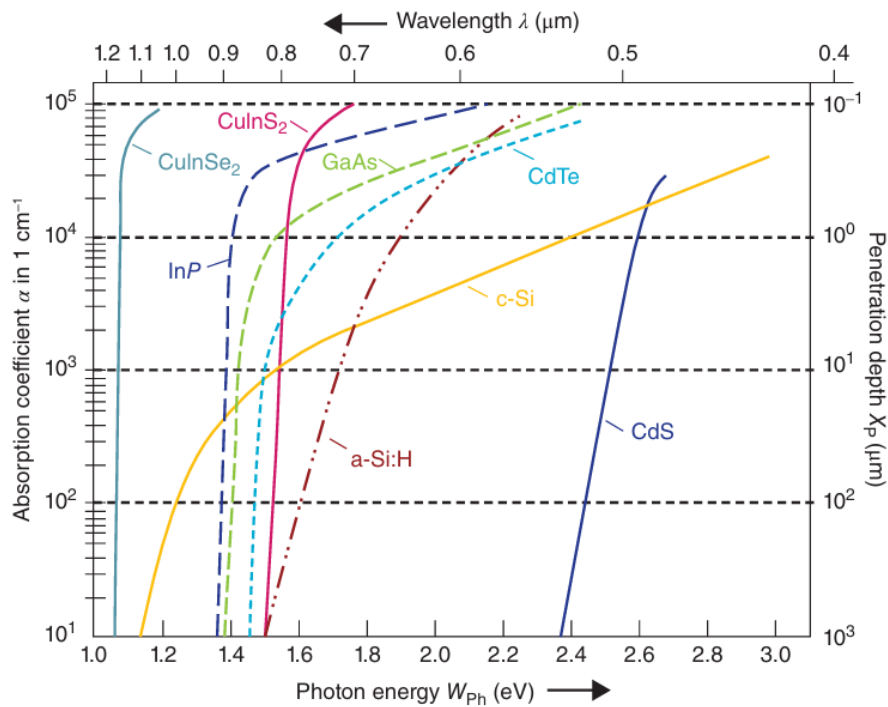


Figura 9: Coeficiente de absorción de diferentes materiales según la longitud de onda del fotón incidente, junto a la profundidad de penetración del mismo. Todos menos el silicio cristalino son de *gap* directo. FUENTE: *Photovoltaics. Fundamentals, Technology and Practice*.

Asimismo, la luz también puede ser reflejada, dependiendo esto de los coeficientes de absorción del medio, del cristal, el ángulo de incidencia y de si se emplea una capa antirreflectante. El uso de Si_3N_4 , habitualmente empleado para paneles fotovoltaicos, ayuda a que el factor de reflexión se reduzca considerablemente en el espectro visible para el silicio [25].

3.1.9 Adaptaciones ópticas de las células fotovoltaicas

Además de la capa antirreflejante, se suele texturizar la superficie superior de las células con el fin de disminuir las pérdidas por reflexión. En el caso del silicio monocristalino, se fabrican estructuras piramidales [26].

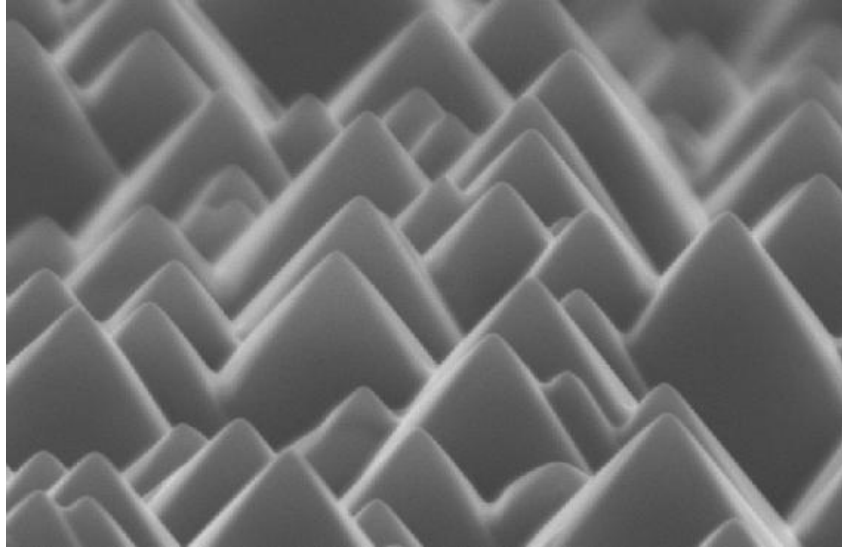


Figura 10: Texturizado piramidal en silicio, observado con un microscopio electrónico de barrido. Imagen obtenida por la Escuela de Ingeniería de Energía Renovable y Fotovoltaica, Universidad de Nueva Gales del Sur. FUENTE: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/surface-texturing>

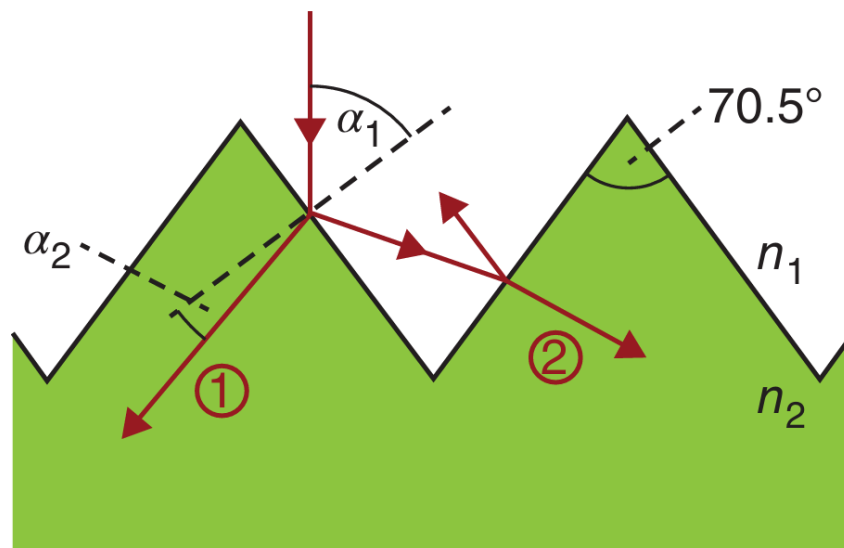


Figura 11: Diagrama de reflexión y refracción de la luz en el texturizado piramidal. FUENTE: *Photovoltaics. Fundamentals, Technology and Practice*.

Considerando el esquema de la fig. 11, el factor de reflexión $R(\alpha)$ puede calcularse con la siguiente ecuación derivada de las leyes de Fresnel:

$$R(\alpha) = \left(\frac{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} \right)^2 \quad (1)$$

pudiendo α_2 ser determinado por la ley de la refracción [26], descubierta por ibn Sahl.

De esta forma, se incrementa la eficiencia de la célula con un mayor aprovechamiento de la luz incidente.

3.2 Paneles fotovoltaicos

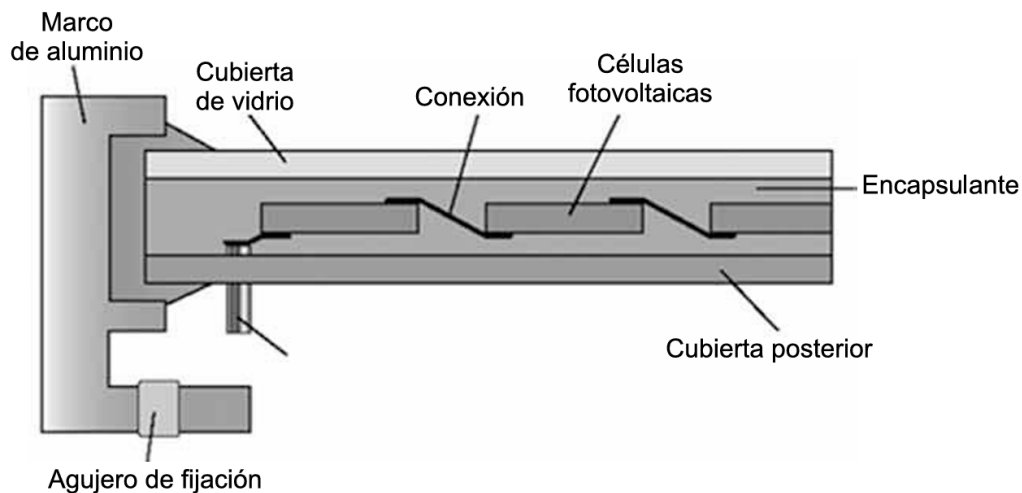


Figura 12: Elementos de un panel fotovoltaico. FUENTE: *Centrales de energías renovables: generación eléctrica*.

Las placas fotovoltaicas se fundamentan en la conexión de diversas células de uniones p-n, con cubiertas para su protección y un marco de aluminio para la fijación y estructura.

3.2.1 Funcionamiento de la célula

La unidad más pequeña de producción fotovoltaica en un panel es la célula. Ésta se compone de una unión p-n dopada con una fuente de tensión conectada en sentido directo, con la opción de una capa antirreflectante para optimizar la absorción de

fotones incidentes.

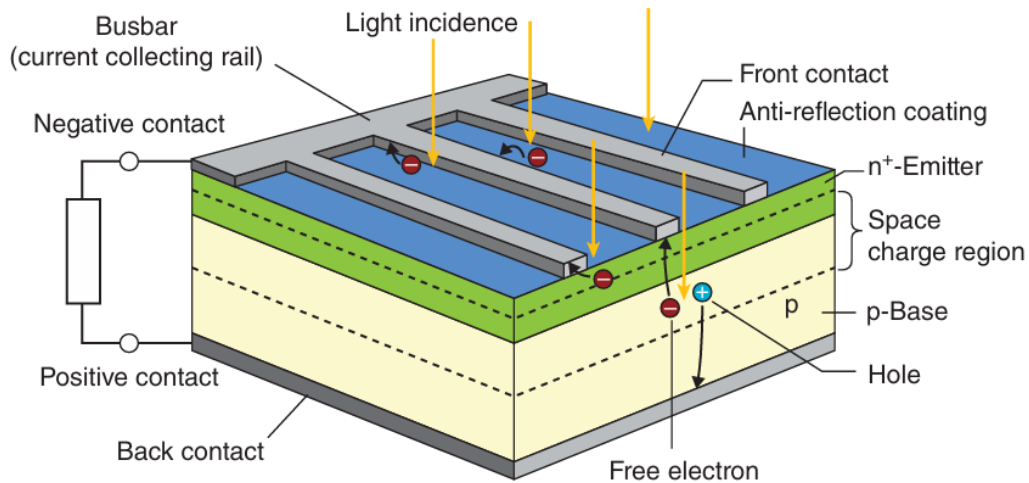


Figura 13: Célula promedio basada en la unión p-n de silicio, con la zona n desproporcionadamente dopada respecto a la p. De esta forma, los portadores de carga principales son los electrones. FUENTE: *Photovoltaics. Fundamentals, Technology and Practice*.

Tras la incidencia de un fotón con la suficiente energía, se genera un par electrón-hueco, tal que cada uno es desplazado de la región de unión al contacto correspondiente de la fuente de tensión [27].

En una célula basada en silicio como la de la fig. 13, según la longitud de onda, el fotón podrá penetrar con mayor o menor profundidad como indica la fig. 9. A nivel superficial, la recombinación del par electrón hueco creado es altamente probable. En el intervalo de magnitud de entre 0.1 y 1 μm se encuentra la región de agotamiento del semiconductor, donde la absorción de luz contribuye con dos portadores de carga con bajas posibilidades de recombinación. Este efecto se puede lograr hasta una profundidad de unos 100 μm o lo que abarque la longitud de difusión. Más allá, la recombinación del par electrón-hueco generado habrá ocurrido antes de contribuir a la corriente. Se puede reducir este último fenómeno con la adición de un contacto en la parte trasera que refleje los electrones [27].

3.3 Tecnología actual en el ámbito de la energía solar

Aunque existe una interesante trayectoria en el desarrollo actual de paneles fotovoltaicos tanto comercializados como en fase de experimentación, tales como los paneles

de alta eficiencia de perovskitas o los bifaciales, la forma más económica de optimizar la producción energética y acomodar la demanda es a través de los demás dispositivos asociados a la conexión.

3.3.1 Microrredes

El concepto de microrredes o *microgrids*, se define como un conjunto de microgeneradores, dispositivos de distribución y almacenamiento que operan en regímenes de baja tensión como un sistema unificado que suministra energía eléctrica a una zona concreta. Los componentes esenciales son una red de distribución de baja tensión, una infraestructura de comunicación local, un sistema de gestión, dispositivos almacenadores y controladores inteligentes de producción y consumo. Son capaces de operar tanto de forma aislada como conectadas a una red general. Al pasar al modo aislado, la respuesta puede ser un poco lenta y por ello se requieren fuentes de almacenamiento e inversores capaces para mantener la tensión y frecuencia [28].

La intermitencia de las fuentes de generación renovables solar y eólica complica la administración de la energía por parte de las microrredes. Habitualmente se emplean pronósticos y árboles de decisiones, que resultan insuficientes. En estos últimos años, con los avances en inteligencia artificial y contando con datos de consumo y clima, se han podido elaborar nuevos modelos de predicción. Además, se empieza a hacer uso del *deep learning* con el fin de establecer relaciones entre sendos datos. Una de las mejoras más reciente a estas medidas es el desarrollo de modelos de predicción, que, entre otros aspectos, hacen un uso conjunto de redes neuronales y sistemas bidireccionales de memoria a corto y largo plazo [29].

3.3.2 Inversores

El uso de inversores inteligentes, es decir, con capacidad de operar de manera autónoma y eficiente, presenta una buena sinergia con la implementación de las microrredes. Su rol evoluciona de mera conversión de corriente continua a corriente alterna a un dispositivo que gestiona el suministro energético, detección de fallos e incluso una interfaz entre producción y consumo [30]. Las funciones principales que caracterizan un comportamiento inteligente por parte de un inversor son: *plug and play*, autocons-

ciencia, adaptabilidad, autonomía y cooperatividad.

Las competencias a tener en cuenta a la hora de evaluar los factores anteriores incluyen la distancia y efectividad de comunicación entre dispositivos, capacidad de identificación, localización y reparo de fallos; elaboración de pronóstico y monitorización ante futuros percances, estimación de diferentes parámetros tales como la impedancia, autosincronización según la frecuencia, control descentralizado de la corriente, flexibilidad en el cambio de modo operativo según impedancia y control durante el estado de transición o reparto de la energía [30].

3.3.3 Almacenamiento energético

Los sistemas de almacenamiento con baterías o BESS (*Battery Energy Storage Systems*) facilitan la distribución de corriente según perfiles de demanda y resultan especialmente compatibles con la generación energética de origen renovable dada su inherente variabilidad en la producción eléctrica. Los componentes de un BESS, además de las propias baterías o dispositivos híbridos de baterías y supercondensadores, incluyen sistemas de monitorización y control y convertidores de corriente conectados al sistema de gestión energético asociado a la red y los generadores. Un factor a tener siempre en cuenta es la descarga de las baterías, pues impactan negativamente en su longevidad, por lo que la implementación de algoritmos que balanceen la demanda y el funcionamiento óptimo de la batería son altamente beneficiosos. Song et al. en su artículo del año pasado ofrecen tanto optimizaciones matemáticas como con inteligencia artificial [31].

Las baterías son dispositivos basados en reacciones redox. Las más fabricadas son las de plomo ácido, ión-litio, níquel-cadmio, azufre-sodio y de flujo. Las primeras son las más baratas, pero presentan el mayor límite de descarga y baja densidad energética, además de potenciales complicaciones en cuanto a toxicidad. Las segundas, empleadas más comúnmente en dispositivos móviles o vehículos eléctricos, ofrecen gran duración y densidad energética, pero funcionan peor a bajas temperaturas. Las baterías de níquel y cadmio son difíciles de reciclar y no muy recomendables para gestión de sistemas energéticos pero operan de manera satisfactoria a altas temperaturas. Las de sodio y azufre son bastante eficientes a temperaturas superiores a

300 °C, y su uso principal es precisamente el almacenamiento eléctrico en redes. El último tipo emplea uno o más tipos de electrolitos, y su energía es proporcional al tamaño de los tanques que los contienen [32].

Los condensadores o capacitores son dispositivos eléctricos compuestos de dos láminas conductoras, separadas por un material dieléctrico, capaces de almacenar carga eléctrica. El desarrollo de los supercondensadores de tipo electroquímico de doble capa o pseudocapacitores son capaces de aportar menores repercusiones ecológicas, mayor velocidad de carga y descarga y mayor densidad de potencia a su combinación con las baterías tradicionales, las *supercapatteries*. El modo de combinación consiste en emplear un electrodo carbonáceo poroso capacitor y otro faradaico. La longevidad, capacidad de almacenamiento y temperaturas de operación también son ampliadas respecto a sus contrapartes no híbridadas [33].

El material empleado en las láminas capacitoras determina su funcionamiento. Diversos materiales basados en el carbono demuestran estabilidad química, robustez mecánica, gran conductividad eléctrica y compatibilidad con una amplia variedad de electrolitos. Frente al uso de grafito y combustibles fósiles como fuentes de carbono poroso, se encontró una alternativa más ecológica y barata de gran funcionamiento hace unos años, que parte de una estructura porosa de amplia utilidad: las pieles de plátano. Tras el procesamiento químico de enfriado, calentamiento y tratamiento con nanopartículas, se observó que el material ofrecía excelentes resultados tanto para supercondensadores como para baterías de litio y azufre. Uno de los aspectos más interesantes es que, tras la preparación de las pieles para activar el carbono, se distinguen diferentes capas que las dotan tanto de estructura como de viabilidad a la hora de alojar nanohilos de NiCo_2O_4 para mejorar la capacitancia [34].

3.3.4 Plan de contingencia contra un apagón general de la red

El 28 de abril de 2025, hubo un apagón durante varias horas que afectó a la Península Ibérica. La causa fue un pico de tensión en varias plantas eléctricas al sur de España [35]. Los sistemas de generación de autoconsumo sin modo isla también dejaron de funcionar, dada la desconexión de los inversores al no detectar señal de la red general [36], siendo los generadores de emergencia la única fuente de electricidad.

Es por este evento que se publicó el nuevo Real Decreto-ley en junio de este año, en el que se producen las modificaciones especificadas en la sección 1.2 de este estudio.

La implementación de microrredes e inversores inteligentes permitiría no sólo hacer frente a una situación similar, sino incluso optimizar la distribución energética y mejorar el abastecimiento en zonas de difícil acceso. Parte de los problemas de gestión acaecidos se verían solventados con la opción de funcionamiento aislado y contando con sistemas de almacenamiento para situaciones de emergencia.

4 Instalación y funcionamiento general

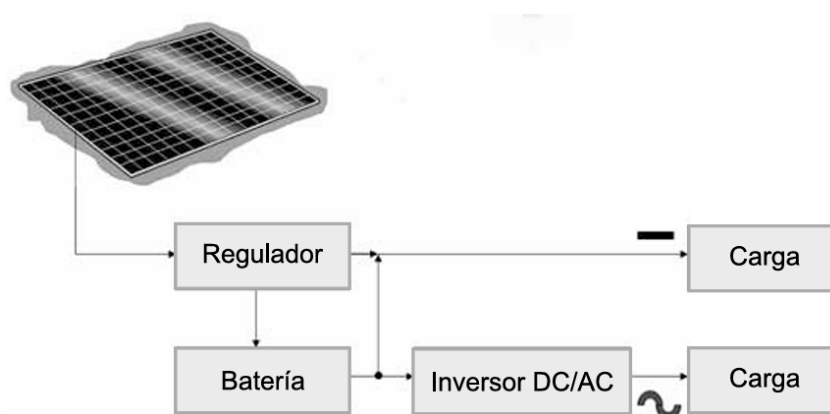


Figura 14: Esquema básico de una instalación fotovoltaica autónoma. FUENTE: *Centrales de energías renovables: generación eléctrica*.

4.1 Características necesarias

Además de la obtención de diversas autorizaciones y licencias previas a la instalación, con información más detallada en diversas guías redactadas por el IDAE, el apartado más pertinente para este estudio en cuanto a implementación son las condiciones de conexión y acceso a la red eléctrica.

De acuerdo al Real Decreto 244/2019, se contemplan dos opciones de conexión a los consumidores en un autoconsumo colectivo: en red interior o a través de red interior. Siempre y cuando al menos uno de ellos esté conectado en red interior al sistema de generación, no existe ningún tipo de limitación legal en cuanto a distribución

y conexión del resto. Se requiere un equipo de medida de generación neta, además de contadores en serie o paralelo según elija cada consumidor

Los elementos básicos son: generador (los paneles fotovoltaicos en este caso), el inversor, una sección de distribución eléctrica y un contador. De manera adicional, puede incluirse un sistema de almacenamiento y un regulador de carga.

En el caso de autoconsumo sin excedentes, ha de instalarse un sistema antivertido a la red eléctrica general.

4.2 Requisitos de conexión a la red eléctrica general

Respecto a los módulos fotovoltaicos, deberán satisfacer las normativas estipuladas tanto si se basan en silicio cristalino como en capa delgada, e incluir diodos de derivación con el fin de evitar posibles averías debidas a sombras parciales, entre otras especificaciones [37].

Las características eléctricas de los inversores incluyen pero no se limitan a: un funcionamiento garantizado entre 0 °C y 40 °C y humedad relativa de hasta el 85 %, la potencia generada deberá estar entre el 25 % y 100 % de la potencia nominal , y a partir de una potencia generada mayor en un 10 % a la nominal se deberá inyectar en red. Las pruebas de funcionamiento han de realizarse en condiciones estándar de medida (CEM). El cableado ha de ser de cobre y estar preparado para evitar caídas de tensión y sobrecalentamientos, variando la sección según si se trata de corriente alterna o corriente continua [37].

Toda instalación de baja tensión debe cumplir con lo dispuesto en los artículos 8, 9, 10, 11, 12 y 13 del Real Decreto 1663/2000 [37].

4.3 Esquemas de configuraciones posibles según instalaciones de generación

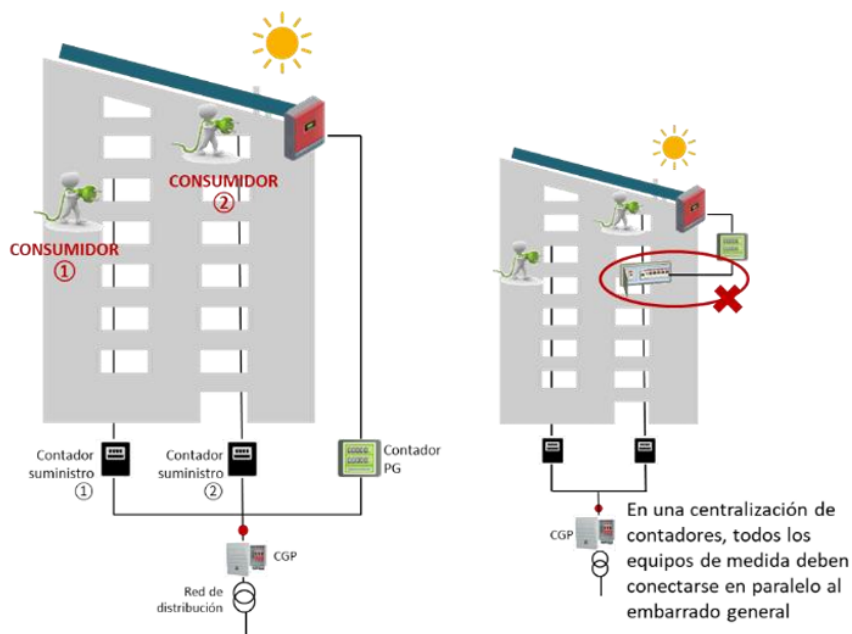


Figura 15: Ejemplo de disposición en red interior con una fuente de generación, con los contadores de cada consumidor y el contador de punto de medida de generación en paralelo debido a la ley de propiedad horizontal. FUENTE: *Guía Profesional de Tramitación de Autoconsumo (IDAE)*.

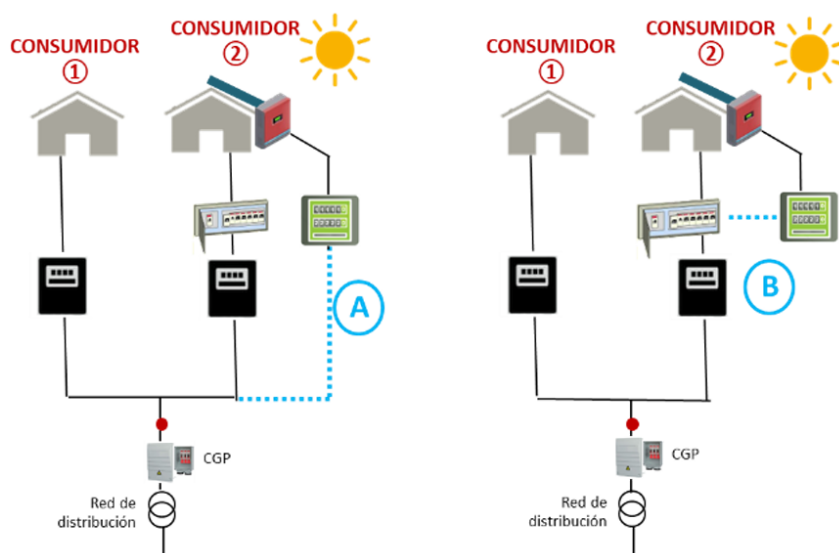


Figura 16: Ejemplo de disposición en red interior con una fuente de generación, siendo posible la conexión de los contadores tanto en paralelo como en serie. FUENTE: *Guía Profesional de Tramitación de Autoconsumo (IDAE)*.

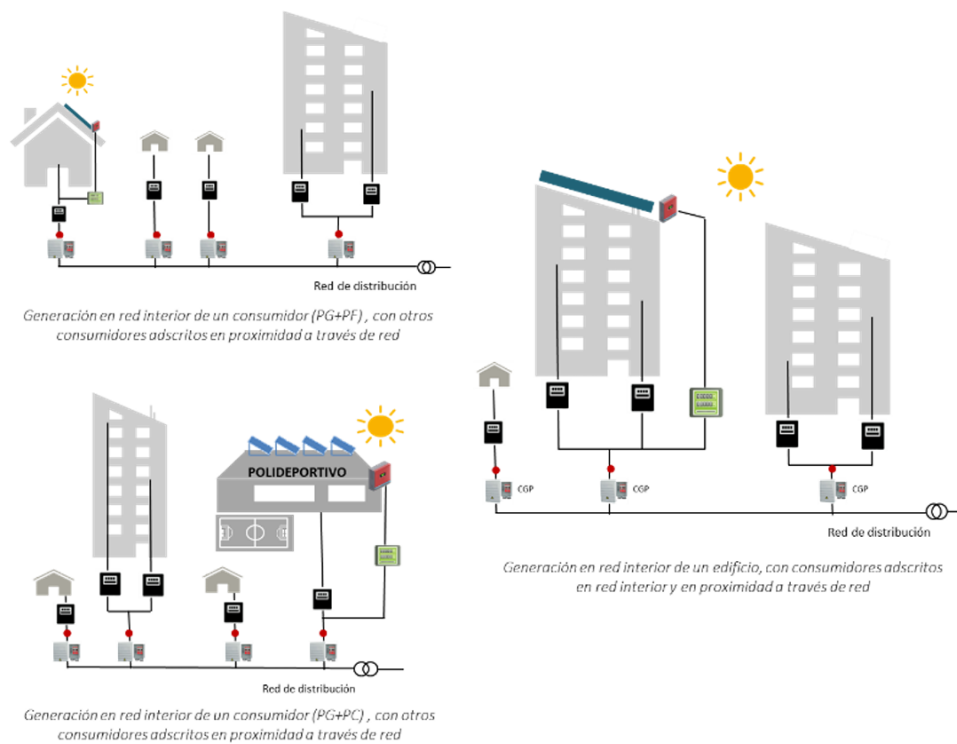


Figura 17: Ejemplos de disposiciones a través de red. FUENTE: *Guía Profesional de Tramitación de Autoconsumo (IDAE)*.

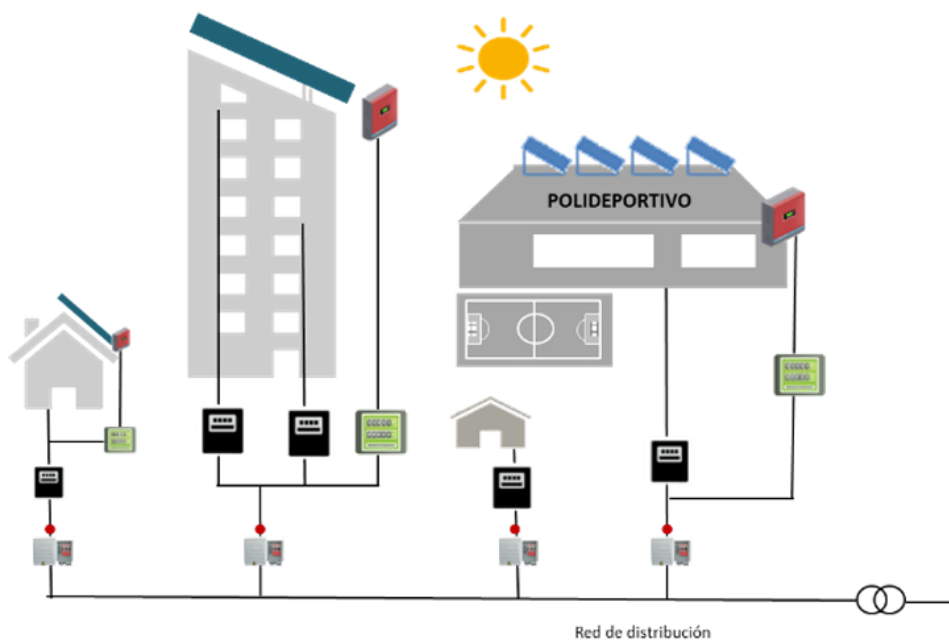


Figura 18: Ejemplo de disposición con conexión en red interior y varios generadores, con los contadores en paralelo o en serie según las leyes pertinentes a las que esté sujeto cada edificio. FUENTE: *Guía Profesional de Tramitación de Autoconsumo (IDAE)*.

5 Estudio de la Habana Vieja en Torrelavega

5.1 Proyecto base

Uno de los proyectos de CEL (Comunidad Energética Local) Toda Cantabria incluye la instalación de placas fotovoltaicas en diversos edificios de la ciudad de Torrelavega, uno de los 7 municipios beneficiarios de esta iniciativa de la provincia. Uno de estos puntos de generación sería el pabellón de la Habana Vieja, en cuyo tejado de 798 m² de área se instalarían 266 placas fotovoltaicas con una potencia de 119 kWp, que podrían suministrar energía a 180 viviendas y pequeños comercios. Teniendo en cuenta los otros 11 edificios previstos, la potencia total serían 855 kW, que alcanzarían para inyectar electricidad a un total de 1283 inmuebles y negocios locales [38].



Figura 19: Pabellón de la Habana Vieja. FUENTE: Ayuntamiento de Torrelavega.

A la hora de ampliar el alcance y número de ciudadanía beneficiada, a largo plazo podría plantearse la instalación de sistemas de generación en los tejados de algún negocio o colegio.

Por simplicidad, en este estudio se valorará la idea del pabellón de la Habana Vieja, dado que el procedimiento con el resto de edificios sería similar.

Dada la potencia pico y la cantidad de placas previstas, la potencia de cada una debería ser de casi 450 W. Al no haber especificaciones de modelos, presupuesto o más datos disponibles, se propone el modelo Tiger Neo N-type 60HL4-(V) 460-480 W de Jinko Solar como ejemplo. Dadas sus dimensiones y asumiendo que el área

del tejado es de $40 \cdot 20 \text{ m}^2$ (las medidas de una pista de fútbol sala) e ignorando la convexidad observada en la Fig.20, se pueden colocar un máximo de 17 columnas de 21 paneles cada una o 357 paneles, con un total de 171.36 kWp.

Dada la esperada variabilidad de irradiación solar a lo largo del año, la falta de datos de consumo de la zona y la cantidad de potenciales integrantes de la comunidad será difícil de establecer información para una situación de completa autonomía energética. Por lo tanto, se asumirá conexión a red con sistema antivertido y sistema de almacenamiento, a modo de autoconsumo colectivo sin excesos.



Figura 20: Estado del tejado a fecha de 23 de octubre de 2024. FUENTE: Diario Montañés.

5.2 Producción de energía prevista

5.2.1 Componentes y parámetros relevantes

El programa empleado para calcular la producción es suministrado por la Comisión Europea. Algunos datos se seleccionan dentro del sistema, como las bases de datos de irradiancia según la geografía, y otros han de ser proporcionados enteramente por el usuario.

De las tecnologías disponibles en el ámbito fotovoltaico, el programa utilizado permite elegir entre paneles de silicio cristalino, CIS (sulfuro de cobre e indio) o CdTe. En contraposición con los otros materiales, el silicio cristalino es la base más asentada

y comercializada. Dependiendo de si se consideran paneles de silicio monocristalino o policristalino, la eficiencia de conversión de la energía recibida puede ser mayor o menor, rondando típicamente entre el 14 % y el 23 % [39]. El modelo propuesto como ejemplo, de silicio monocristalino, presenta una eficiencia del 22.24 % [40].

La potencia pico se calculó en el apartado anterior, y la posición de montaje puede ser fijada al tejado o libre, con opción de seguimiento en uno o los dos ejes. Continuando con la información disponible del proyecto, se incidirá en la instalación fija al tejado más adelante, además de tratarse el caso de seguimiento para un eje. Los ángulos de inclinación y acimutal pueden ser optimizados por el propio programa o aportados.

Otro de los factores controlables es el porcentaje de pérdidas del sistema. Aunque el promedio se establece en un 14 %, el uso de mejores inversores puede optimizarlo. Al carecer de referencias numéricas concretas, se procederá con el valor por defecto.

La producción energética fotovoltaica depende principalmente de la irradiancia solar recibida a lo largo del año, la posición de los paneles y la del Sol a lo largo del día, posición del montaje y las sombras de la zona. La herramienta de PGMIS (Photovoltaic Geographical Information System) empleada para obtener la información posteriormente analizada y sus respectivos cálculos tiene en cuenta sendas variables, con datos de la irradiancia desde 2005 a 2023 en su versión más actual [41].

5.2.2 Base de datos PGMIS-ERA5

Cuadro 1: Datos proporcionados para un sistema fijado al tejado y conectado a red, con la radiación solar correspondiente a las coordenadas dada por la base de datos indicada.

Localización [Lat/Lon]	43.357,-4.045
Horizonte	Calculado
Tecnología FV	Silicio cristalino
FV instalada [kWp]	171.36
Pérdidas sistema [%]	14

Cuadro 2: Producción energética con su desviación estándar y suma media de la irradiación recibida según el mes para la información dispuesta en el cuadro 1.

Mes	E / kWh	σ_E / kWh	$\sum R_m$ / kWh·m ⁻²
Enero	12736.5	1578.3	91.7
Febrero	15227.5	2111.0	111.0
Marzo	20389.9	1948.0	152.8
Abril	20427.0	2027.5	156.0
Mayo	21749.6	1244.2	166.8
Junio	20196.8	1167.0	158.8
Julio	21156.9	1470.0	168.2
Agosto	21215.5	1349.9	168.1
Septiembre	19875.9	1320.0	155.2
Octubre	17712.0	1506.2	134.9
Noviembre	12945.4	2027.7	93.8
Diciembre	12243.1	1268.9	88.2

En el cuadro 2 se aprecia que el mes de menor irradiación y producción es diciembre, seguido de enero y noviembre, lo cual es bastante coherente. Los meses de mayor bonanza energética serían mayo, agosto y julio; casi el doble que en el trimestre previamente mentado. Tomando en cuenta los perfiles de consumo, esta información es la más relevante a la hora de estimar la capacidad de almacenamiento a instalar. Tanto por la escasez de luz natural como por el uso de la calefacción, típicamente la época de mayor demanda es invierno.

Cuadro 3: Resultados de la simulación para los datos del cuadro 1, con los ángulos optimizados por el programa.

Ángulo de inclinación [°]	39
Ángulo de azimut [°]	-2
Producción anual FV [kWh]	216330.67
Irradiación anual [kWh/m ²]	1645.62
Variación interanual [kWh]	5984.30
Cambios en la producción debido a:	
Ángulo de incidencia [%]	-2.56
Efectos espectrales [%]	1.36
Temperatura y baja irradiancia [%]	-9.68
Pérdidas totales [%]	-23.28

Dada la irradiación anual recibida y el área abarcada por paneles, la energía recibida es de $1.3 \cdot 10^6$ kWh, de la cual se aprovecharía un 16.64% según el cuadro 3.

5.2.3 Base de datos PGVIS-SARAH3

Cuadro 4: Datos proporcionados para un sistema fijado al tejado y conectado a red, con la radiación solar correspondiente a las coordenadas dada por la base de datos indicada.

Localización [Lat/Lon]	43.357,-4.045
Horizonte	Calculado
Tecnología FV	Silicio cristalino
FV instalada [kWp]	171.36
Pérdidas sistema [%]	14

Cuadro 5: Producción energética con su desviación estándar y suma media de la irradiación recibida según el mes para la información dispuesta en el cuadro 4.

Mes	E / kWh	σ_E / kWh	$\sum R_m$ / kWh·m ⁻²
Enero	10820.3	1856.9	79.1
Febrero	13023.3	2634.9	96.5
Marzo	17500.1	2602.7	132.8
Abril	18898.3	2212.7	146.2
Mayo	19952.9	2179.9	155.1
Junio	18546.9	1566.7	147.7
Julio	19659.5	1453.9	157.7
Agosto	19715.3	1461.5	157.6
Septiembre	18835.7	1232.4	148.5
Octubre	15933.5	1484.2	122.6
Noviembre	11287.1	2445.1	83.2
Diciembre	11093.0	1733.9	81.1

En el cuadro 5 se observa que el mes de menor irradiación sería enero, seguido de diciembre y noviembre. Nuevamente, es un resultado esperable. La mayor época de producción se concentraría en mayo, agosto y julio en ese orden.

Cuadro 6: Resultados de la simulación para los datos del cuadro 4, con los ángulos optimizados por el programa.

Ángulo de inclinación [°]	37
Ángulo de azimut [°]	1
Producción anual FV [kWh]	195676.97
Irradiación anual [kWh/m ²]	1507.98
Variación interanual [kWh]	6301.97
Cambios en la producción debido a:	
Ángulo de incidencia [%]	-2.8
Efectos espectrales [%]	1.34
Temperatura y baja irradiancia [%]	-10.62
Pérdidas totales [%]	-24.28

Considerando la irradiación anual y el área de todos los paneles a instalar, la energía recibida sería $1.2 \cdot 10^6$ kWh, con un aprovechamiento del 16.31 %.

5.2.4 Comparación entre ambas bases y resultados

La base de datos PGVIS-ERA5 ofrece valores algo más altos para la irradiación que la PGVIS-SARAH3 a nivel anual, lo cual puede achacarse parcialmente a la menor pérdida por el ángulo de incidencia y temperatura. Los tres meses de menor y mayor producción respectiva coinciden, aunque para la base PGVIS-SARAH3 presenta unas medidas más esparcidas: en los meses de invierno la irradiación es algo mayor y en los meses de primavera-verano es algo menor en comparación con la simulación que emplea la PGVIS-ERA5. En general, las cifras no discrepan entre sí de manera significativa y pueden usarse ambos conjuntos de información para establecer rangos de variabilidad.

Partiendo del dato orientativo de consumo anual en una vivienda española de 3487 kWh [42], junto con toda la información obtenida en los cuadros 3 y 6, la producción podría abastecer completamente de 56 a 62 hogares cada año. Si se reparte entre las 180 viviendas como se propone en el proyecto de CEL Torrelavega, cada una se ahorraría desde un 31.18 % hasta un 34.47 % de la factura de la electricidad. Recordando el caso de COMPTEN Crevillent, cuyos inicios como comunidad energética partieron de una producción similar, se alcanzaría a satisfacer a tan solo el 50 % de la demanda eléctrica de ese intervalo de entre 56 y 62 viviendas [10]. Esta discrepancia se achaca

al cálculo simplificado de consumo anual medio frente a la verdadera variación a lo largo del año. Como se señaló anteriormente, los meses de menor producción suelen ser los de mayor demanda. Según la capacidad de almacenamiento instalada, las reservas generadas entre mayo y agosto podrían no ser suficientes para hacer frente al invierno. En el caso de pequeños negocios, según su naturaleza y horarios de operación, la demanda energética sería menor y más fácil de resolver.

Aún considerando el nuevo radio de autoconsumo legal, y todos los edificios contemplados en la subvención, las zonas beneficiadas por la medidas constituirían un bajo porcentaje en la ciudad, partiendo de que se prevé el suministro a 1282 hogares y pequeños comercios y que la población total supera ligeramente los 50000 habitantes [38][43].

5.3 Disposición propuesta

5.3.1 Módulos fotovoltaicos

Existe la consideración de la rentabilidad energética dada la posibilidad de instalación de placas con capacidad de seguimiento para el Sol en vez de fijadas al tejado. Partiendo de la misma aproximación realizada para el área útil y el mismo modelo de paneles, habría que considerar primero el efecto de las sombras entre paneles para determinar la nueva cantidad máxima a instalar.

La separación mínima d entre una hilera de paneles y un obstáculo, como por ejemplo otra hilera, viene dada por la siguiente expresión:

$$d = \frac{h}{\tan(61^\circ - \phi)} \quad (2)$$

con h siendo la altura de dicho obstáculo respecto a la superficie en la que instalar el panel y ϕ la latitud [44].

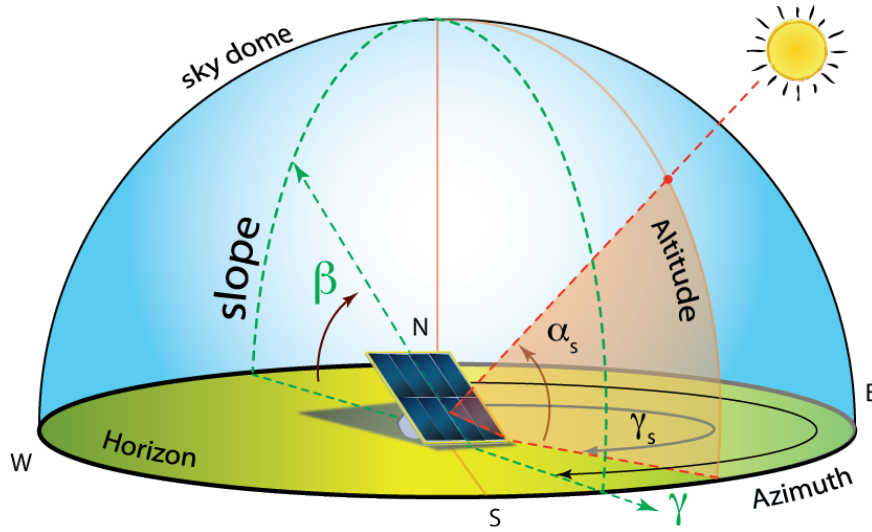


Figura 21: Ángulos de inclinación de un panel y altitud del Sol. FUENTE: <https://bit.ly/2qOhwOh>

En base a las indicaciones del IDAE, el ángulo óptimo de inclinación máximo para los paneles (para $\alpha = 0^\circ$, siguiendo con la nomenclatura de la Fig.21) es en diciembre, de $\beta = \phi + 10$ [45]. Considerando esta información, la ec.(2) para este caso quedaría como

$$d = \frac{l \cos(\phi + 10^\circ)}{\tan(61 - \phi)} \quad (3)$$

siendo l el lado en cuestión del panel.

Teniendo en cuenta la orientación del edificio, las dimensiones conocidas de los paneles y la ec.(3), el número máximo a instalar serían 12 filas de 10 paneles cada una, dispuestos de manera horizontal y una separación mínima $d = 2,86$ m entre cada hilera para β_{max} , reducida a 2.18 m para $\beta = 0$. La potencia pico asociada a esta distribución sería de 57.6 kW. El mismo análisis podría emplearse para una instalación fija con opción a varias posiciones concretas, conociendo los ángulos de las mismas.

Cuadro 7: Resultados de la simulación para seguimiento en un eje con ángulo inclinado, con los ángulos optimizados por el programa.

Base de datos	PGVIS-ERA5	PGVIS-SARAH3
Ángulo de inclinación [°]	41	39
Producción anual FV [kWh]	96848.54	85340.17
Irradiación anual [kWh/m ²]	2089.11	1868.77
Variación interanual [kWh]	3091.9	2988.2
Cambios en la producción debido a:		
Ángulo de incidencia [%]	-1.42	-1.71
Efectos espectrales [%]	1.32	1.32
Temperatura y baja irradiancia [%]	-6.3	-7.43
Pérdidas totales [%]	-19.52	-20.72

Comparando los datos del cuadro 7 frente a los respectivos de los cuadros 3 y 6, se observa que las pérdidas se reducen de manera poco significativa y la producción anual se reduce a la mitad. De esta forma se estima que la instalación previamente contemplada, fijada al tejado, es la más óptima en cuanto a aprovechamiento de la irradiación recibida.

Dependiendo de la carga que pueda soportar el tejado, pueden explorarse opciones como las de la fig. 22, que contemplan el flujo del viento e incluso lo emplean a su favor.

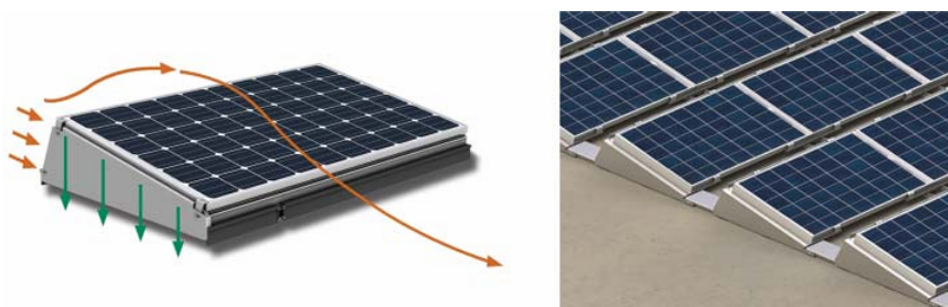


Figura 22: Paneles con un ángulo de ataque que favorece el empuje hacia el suelo por parte del viento en una dirección, con aberturas en el lado contrario para que el viento en sentido opuesto genere un vacío y succión al tejado. FUENTE: *Photovoltaics. Fundamentals, Technology and Practice*.

5.3.2 Inversores

Dada la baja curvatura del tejado observada en la fig. 20, se estima que no exista sombreado parcial localizado considerable, por lo que no se aprovecharían varios

inversores en cadena. Con la potencia pico que se prevé instalar, sería más recomendable la configuración maestro-esclavo [46].

El dimensionamiento de potencia en conjunto debería ser de aproximadamente 171 kW para optimizar la eficiencia anual. La tensión de los inversores determina el rango en la cantidad de paneles conectados en serie:

$$n_{max} = \frac{V_{inv-max}}{V_{OC-M}(-10C^0)} \quad (4)$$

$$n_{min} = \frac{V_{MPP-inv-min}}{V_{MPP-M}(70C^0)} \quad (5)$$

correspondiéndose V_{OC} con la tensión en circuito abierto, el subíndice MPP al punto de máxima potencia en el diagrama $I - V$ y el subíndice M a los módulos fotovoltaicos [47]. Todos estos datos han de ser provistos en las fichas técnicas respectivas por parte de los fabricantes. Continuando con los parámetros relevantes de los paneles [40] y los de una serie de inversores [48] por dar cifras referenciales, según las ecs.(4) y (5) cada ramal habría de poseer entre 6 y 24 placas. Por lo tanto, podrían conectarse en serie los 21 paneles de cada columna sin mayor inconveniente en ese plano.

Asimismo, la corriente máxima de un inversor condiciona la cantidad máxima de hileras de paneles que pueden ser conectadas a una de las salidas.

$$n_{string} \leq \frac{I_{inv-max}}{I_{string-max}} \quad (6)$$

Continuando con los modelos anteriores de inversor y paneles con los datos pertinentes a la ec.(6), multiplicando el denominador por 1.25 para prevenir en caso de una irradiancia superior a la media, tanto para una cadena doble como una solitaria el máximo a conectar por salida es una. Según la distribución sistema-esclavo más óptima, se establecerán las conexiones necesarias.

5.3.3 Baterías

Con el fin de aprovechar plenamente la producción y favorecer la autosuficiencia energética, se aconseja la instalación de un sistema de almacenamiento. El dimen-

sionamiento de baterías depende de los días de autonomía deseados y la vida útil, que se relaciona con la profundidad de descarga de la misma. La capacidad puede calcularse por lo tanto de la siguiente manera:

$$C = \frac{EN_A}{0,7V_N} \quad (7)$$

tal que E es la energía consumida por día, N_A los días de autonomía deseados y V_N el voltaje nominal del sistema. El límite de vaciamiento de la batería se establece aquí como 30 % con el fin de prolongar su vida útil. La cantidad de días varía según la época del año y la zona. Por ejemplo, en Alemania de manera general se pueden establecer 3.5 días para verano o 5.5 para invierno [49].

Dada la variabilidad en la demanda según el hogar o comercio, la opción más cómoda sería la instalación de una batería por edificio contando con la ec.(7), además de algunas auxiliares en el propio pabellón si la estructura lo permite. El programa empleado presenta también la opción de estudio de un sistema fotovoltaico autónomo [41], por lo que se podría evaluar la evolución de cada batería a lo largo de un año una vez conocidos el consumo y la capacidad de la misma.

Asimismo se aconseja la implantación de microrredes con el fin de optimizar la distribución y mantener cierta operatividad en casos de emergencia.

El tipo de baterías más económicas y empleadas en este ámbito son las de plomo ácido. Con el fin de prolongar su vida útil se desaconseja que se descarguen por debajo del 40 % de su capacidad, por lo que requieren un sobredimensionamiento proporcional.

5.3.4 Otras valoraciones

Dada la reciente autorización de autoconsumo individual sin excesos simultáneo con otro tipo de autoconsumo [4], valorando la superficie disponible en los edificios beneficiarios de la producción eléctrica se podría plantear la instalación de más paneles en viviendas y comercios con el fin de lograr tanto autosuficiencia energética como alcance, en una guisa similar a la fig. 18.

Desconociendo el porcentaje de posesión de vehículos eléctricos o híbridos de

la zona, en este estudio se optaría por no instalar puntos de recarga en los aparcamientos cercanos y priorizar el abastecimiento a hogares y negocios dentro del radio permitido. Se estima que no presentarían un uso considerable en el momento presente debido a las circunstancias económicas y la limitada producción eléctrica calculada.

Dentro de la organización en los edificios de viviendas, tal y como se muestra en las Figs. 15 o 16, es imperativa la instalación de un contador de punto de medida, además de los contadores de cada vivienda y teniendo en cuenta la aplicación de la ley de propiedad horizontal cuando correspondiese.

Un problema a considerar es acabar con la pobreza energética, cuyo porcentaje en España es el doble que la media europea [50]. Según datos de 2018 de la Cruz Roja [51], las mayores afectadas por esta situación son mujeres, conformando un 68 % y muchas veces a cargo de menores. La existencia de la pobreza energética requiere una actuación inmediata, tratado en la medida 1.4 del documento del PNIEC. Por lo tanto, se enfatiza la prioridad de suministro a los hogares más vulnerables dentro de un radio de 5 km al pabellón.

5.4 Posibles complicaciones

Algunas de las barreras citadas por el IDAE a la hora de establecer una comunidad energética en España incluyen, entre otros, la complejidad de los procesos administrativos, falta de interés en la ciudadanía, dificultad en el acceso a la financiación o el monopolio en las redes de distribución. Esta serie de factores conllevan a la paralización de proyectos, tales como el propio aquí tratado.

En base a la experiencia documentada de la pionera comunidad energética de Villawatt, los mayores obstáculos reportados durante la planificación e implementación se dieron respecto a la escasez de información de la población en cuanto a reformas energéticas por eficiencia, oposición e influencia negativa del personal del sector de la construcción de la zona, desconfianza motivada por el perfil económico y sociocultural de la ciudadanía participante y conflictos sociales preexistentes en la comunidad [52].

Es menester por lo tanto tener en cuenta la situación específica de la población de la zona más inmediata que percibiría los beneficios de la instalación en el pabellón de la Habana Vieja, la Inmobiliaria. La asociación vecinal del barrio exige mayor se-

guridad y presencia policial en las calles dados los recientes y pasados incidentes ocurridos, por lo que previa a la organización de edificios beneficiados de la energía producida en el pabellón, probablemente requerirían tal cumplimiento o alguna medida similar que conciliase a la ciudadanía [53].

Aun sin la existencia conflictos previos, se cree que cabría la posibilidad de que la discusión de los coeficientes de reparto de la producción energética ocasionara alguna disputa menor.

6 Discusión

6.1 Plano tecnológico

Aunque el empleo de paneles solares convencionales de silicio cristalino resulte más económicamente asequible, no se pueden ignorar los desechos que suponen. Mientras otras alternativas permanezcan en un desarrollo no comercialmente viable, o las opciones disponibles presenten un mayor coste monetario, es menester tener en cuenta las limitaciones y perjuicios que pueda presentar esta variante.

La durabilidad de las placas fotovoltaicas de silicio se estima entre 20 y 30 años, y dada la creciente expansión de uso se estima que para 2030 los desechos fotovoltaicos alcancen de entre 1.7 y 8 millones de toneladas, pudiendo ascender esta cifra a 78 millones para 2050 [54]. Tanto si la dominancia de las placas de silicio es eventualmente sustituida por otro material como si no, el adecuado reciclaje de los paneles tras su vida útil es clave para mantener la sostenibilidad que se busca promover.

Algunos de los métodos recientemente evaluados incluyen procesos mecánicos (separación por alto voltaje, incorporación en cementos, fragmentación electro-hidráulica, etc.), térmicos (pirólisis, uso de solventes orgánicos seguidos de tratamiento térmico, calentamiento en dos fases, etc.) y químicos (degradación con ácido nítrico, sulfuración y neutralización, precipitación de ácidos, etc.). Varias de las limitaciones asociadas incluyen la dificultad a la hora de separar ciertos elementos, coste energético o emisión de productos derivados nocivos para el medioambiente. Sin embargo, factores como la viabilidad económica hacen que la inversión general en el reciclaje de

los paneles fotovoltaicos sea mínima [54].

Los retos que supone que el reciclaje lleve un crecimiento retardado en contraste con el de la producción además de las limitaciones de potencia en el ámbito de la energía solar pueden despertar la idea de desarrollo de nuevos materiales dentro del división de la física de la materia condensada. A este punto se sumaría el hecho de que cada es vez más próximo el límite de Moore en la tecnología basada en silicio en ámbitos generales [55], pero este último concepto, aunque interesante, se escapa de la competencia y el enfoque de este estudio.

La implementación de microrredes en una comunidad energética puede presentar beneficios en la respuesta de la demanda y gestión ante problemas en la red general, por lo que se considera un punto importante a tener en cuenta recordando los precedentes mencionados [28][36].

6.2 Repercusiones medioambientales

Se estima que las emisiones anuales de CO₂ a la atmósfera se reduzcan en 5343 toneladas tras la implementación total del proyecto en los 12 edificios considerados por CEL Torrelavega [38]. Mas la apuesta por las energías renovables ha de ser congruente no sólo en emisiones sino respecto al medioambiente en general.

La incorrecta gestión de las baterías de plomo ácido tras su vida útil, dados sus componentes, puede acarrear consecuencias nefastas tales como incendios, contaminación del medioambiente o daños en los ecosistemas naturales. El mayor riesgo tanto por causa como por probabilidad se asociaría al ácido sulfúrico que actúa como uno de los componentes principales del electrolito según Zhang et al., al encontrarse en estado líquido y contar con mayor facilidad de expansión. Sin embargo, neutralizando el ácido con un compuesto adecuado y una gestión vigilada de los desechos, uno de los problemas se previene sin demasiadas complicaciones [56]. Si se emplean los equipos y procedimientos adecuados en su reciclaje, las emisiones de polvo de plomo a la atmósfera entran dentro del rango legalmente permitido [57]. Sin embargo, el estudio del depósito de plomo atmosférico en un parque forestal del suroeste de China reveló que, en combinación con el pH ácido del suelo, los niveles de toxicidad serían elevados. Asimismo, se encontró una concentración considerable de plomo en

diferentes especies de insectos, cuya ingesta perjudicaría a algunos de sus depredadores tales como pájaros o pequeños mamíferos [58]. Por otro lado, las baterías de ión-litio también presentan cierta problemática medioambiental. Su indebida gestión tras el fin de su vida útil, tanto en transporte como en almacenamiento o proceso de reciclaje, puede ocasionar incendios, transporte aéreo y depósito de ciertas sustancias, emisión de gases tóxicos o incluso explosiones. Las baterías de litio de los vehículos eléctricos de hecho pueden reutilizarse para sistemas de almacenamiento en red durante varios años antes de tener que ser recicladas. Aún así, a fecha de 2021 a nivel mundial el porcentaje de baterías recicladas es bastante bajo. En base a esta tasa, se estima que la forma más común de gestión para estas baterías es su acumulación en vertederos, e, incluso peor, parte se exportan a países más pobres donde se gestionan de manera ilegal para ahorrar costes [59]. Según datos del MITECO, la eficiencia de reciclado legal en España de baterías de diversos tipos ha superado los mínimos establecidos por la ley entre 2016 y 2019 [60], por lo que se espera que esas cifras se mantengan o mejoren con el paso del tiempo. Para reducir el impacto en los ecosistemas del país sería menester concienciar adecuadamente a la ciudadanía participante en la comunidad energética, especialmente a las figuras de gestión, con el fin de que cualquier tipo de dispositivo sea depositado tras su vida útil en el punto limpio más cercano.

6.3 Impacto económico

Gasca et al. (2025), partiendo de estudios previos de comunidades energéticas de diferente número de miembros, diversos enfoques y datos de perfiles de consumo establecieron simulaciones para tres grupos en base a senda información a lo largo de un año con el fin de estudiar la correlación con ciertos parámetros. El grupo 1 cuenta con sistemas de generación suficientes para generar la energía demandada pero no sistemas de almacenamiento, el grupo 2 parte de la misma generación energética con una capacidad de almacenamiento similar a su consumo, y finalmente el grupo 3 produce y almacena el doble de la energía necesaria. El grupo 4 funciona como una media entre ellos [61].

A la hora de evaluar los diferentes grupos establecidos, variando la cantidad de

miembros, se encontró una diferencia considerable en la factura anual global del grupo 3 frente a los demás, siendo la más baja y casi constante independientemente del número de integrantes de la comunidad. Esto se atribuye tanto a su mayor generación y almacenamiento. El crecimiento de la factura conjunta respecto a la cantidad de integrantes de la comunidad entre el grupo 3 y los restantes es muy dispar, siendo el grupo 1 el más perjudicado. Sin embargo, considerando el ahorro por miembro frente a un escenario de autoconsumo individual, el grupo 1 se posiciona más alto. Las causas consideradas son la limitación de acceso energético: en situaciones de demanda, si hay presente algún exceso es posible repartirlo en vez de almacenarse. Finalmente, el mayor porcentaje de autoconsumo se observa en el grupo 2, muy próximo al 100 %. El grupo 3, contando con excesos en la producción que son vendidos e inyectados a la red general, presenta una mayor eficiencia frente al grupo 1, que no cuenta con ningún dispositivo de almacenamiento energético. Además, se encontró que el número de 20 integrantes como “punto de saturación” [61].

Si la variable pasa a ser el porcentaje de prosumidores dentro de la comunidad y el número de integrantes se fija, la factura anual conjunta es en todo momento más baja para el grupo 3, decreciendo inversamente respecto al porcentaje de contribuciones a la producción. El ahorro individual cambia de comportamiento en el grupo 3 a partir de un 75 % de prosumidores, pasando a disminuir significativamente, lo que puede relacionarse con los gastos de inversión al tener mayor configuración de dispositivos. El grupo 2 sería el más beneficiado en cuanto a un autoconsumo individual en este aspecto. Respecto al porcentaje de autoconsumo, se mantiene constante para el grupo 2 y el que más decae con la cantidad de prosumidores es el 1. Considerando estos datos, a nivel general el grupo que mayores beneficios obtendría en los tres parámetros sería el 4 [61].

Cuando se considera el nivel de heterogeneidad de perfiles de consumo, la factura conjunta sigue siendo inferior para el grupo 3 y más alta para el 1. Asimismo, el ahorro para un autoconsumo individual es menor en el grupo 2 y más significativa para el 3. El grupo 2 sigue liderando el porcentaje de autoconsumo, siendo el 1 es último. Se aprecia que la diversidad en cuanto a perfiles de consumo puede ser beneficiosa para los gastos y la autonomía energética, aunque el impacto no es excesivo [61].

Teniendo en cuenta toda la información aportada por este artículo, se establece que la instalación de dispositivos almacenadores además de aprovechar de manera más eficiente la irradiación recibida y favorecer la autosuficiencia a nivel de gestión en caso de almacenamiento o aumento repentino de la demanda, resulta beneficioso desde un punto de vista económico tanto a nivel colectivo como individual. La diversificación y abundancia en la producción energética conllevan un ahorro global contando con la venta de excesos, aunque el ahorro individual no se vea tan afectado. Dado el posible efecto positivo de la variedad en la demanda diaria, la inclusión de los pequeños comercios de la zona resultaría conveniente. Buscando obtener un mayor aprovechamiento energético, se aconseja invertir en aumentar los puntos de generación tras asentar el proyecto de CEL no como meta sino como un inicio.

6.4 Consecuencias sociales

El ahorro monetario que puede suponer la implementación de una comunidad energética aliviaría hasta cierto punto la carga económica de las viviendas implicadas. Cabría la posibilidad de favorecer la integración social de los grupos más marginales al impulsar el sentimiento de cooperación comunitaria y mejorar la situación económica.

Aunque este factor seguramente sea el más complicado de solventar a la hora de la organización y trato con la ciudadanía participante, el establecimiento de la comunidad energética sería capaz de reforzar sentimientos de pertenencia a un grupo, unidad dentro del mismo y mayor cohesión.

Evidentemente, también existe el riesgo de que dada la preexistencia de tensiones y conflictos entre ciertos sectores, si no se resuelven previamente a través de alguna mediación por parte de los servicios sociales del ayuntamiento, por ejemplo, resulta verosímil que el forzamiento a una coexistencia y convivencia aún más estrecha empeore la situación. Se espera que, tal y como en el caso de Vilawatt, la ejecución de medidas consideradas necesarias por la población sean la forma de convencer para el desarrollo de la comunidad energética.

Asimismo, no es descartable que la concienciación energética derivada de este plan acabase influenciando positivamente a la ciudadanía en otros planos de actuación para con el medioambiente y su gestión de consumo energético personal.

7 Conclusiones

La incipiente entidad de comunidad energética ofrece una oportunidad para la participación y concienciación ciudadana con la crisis energética y medioambiental actual, contribuyendo a la reducción de las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera.

Se espera que el desarrollo de una comunidad energética en Torrelavega ayude a mejorar la situación económica local y que la gestión de los medios de producción energéticos suponga un paso adelante en la lucha contra la pobreza energética y contribuya positivamente a la posición económica de la población implicada, además de favorecer la cohesión social y la cooperación. Puede suponer una oportunidad para concienciar a la población sobre gestión energética responsable, cooperación con colectivos socialmente marginados y dotar de una perspectiva más comunal y menos individualista. Sin embargo, el porcentaje de población involucrada inicialmente es potencialmente bajo, limitando de esta forma el alcance e impacto de estas medidas en la ciudad. A pesar de este hecho, con la información actualmente disponible no se han encontrado obstáculos decisivos para evitar el desarrollo del proyecto en Torrelavega. Se requiere un estudio más exhaustivo de las variables en juego y fomentar el interés en el resto de la ciudadanía por el crecimiento y expansión del proyecto.

Aunque la actuación sea a nivel local, no hay que perder la perspectiva del impacto global, y la apuesta por la energía fotovoltaica debe ir acompañada de una responsabilidad equivalente. Desplazar los restos de los dispositivos tras su vida útil a otros países más pobres o la gestión ilegal de residuos pueden adquirir aún más relevancia conforme avance la transición energética, por lo que se debe actuar en consecuencia desde el principio.

Referencias

[1] Real Decreto 244/2019, de 5 de abril, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica. *Boletín Oficial del Estado*, 6 de abril de 2019, 83, p. 9. [Consulta: 25/02/2025].

<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2019-5089>

[2] *Ibídem*, pp. 8-13.

[3] Real Decreto-ley 07/2025, de 24 de junio, aprueban medidas urgentes para el refuerzo del sistema eléctrico. *Boletín Oficial del Estado*, 25 de junio de 2025, 152, p. 26-42. [Consulta: 19/07/2025]. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2025-12857>

[4] *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030*, pp. 7-9.

<https://www.miteco.gob.es/es/prensa/pniec.html>

[5] *Ibídem*, p. 81.

[6] *Ibídem*, pp. 105-106.

[7] Directiva (UE) 2018/2001 del Parlamento Europeo y del consejo de 11 de diciembre de 2018 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 21 de diciembre de 2018, p. 22. <https://www.boe.es/doue/2018/328/L00082-00209.pdf>

[8] Directiva (UE) 2019/944 del Parlamento Europeo y del consejo de 5 de junio de 2019 sobre normas comunes para el mercado interior de la electricidad y por la que se modifica la Directiva 2012/27/UE. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 14 de junio de 2019, p.16. <https://www.boe.es/doue/2019/158/L00125-00199.pdf>

[9] Mas Belso, Joaquín P. Crevillent, la primera comunidad energética de España. *Ambienta*, **131**, p. 30. [Consulta 17/03/2025].

<https://www.revistaambienta.es/content/dam/revistaambienta/files-1/Revista-Ambienta/compartidos/AMBIENTA%20131%20CREVILLEN.pdf>

[10] *Ibídem*, pp. 31-35.

[11] Vilawatt. Qué somos. ¿Cómo y por qué nace Vilawatt? [Consulta 19/03/2025]. <https://vilawatt.cat/es/que-som/por-que-y-como-nace-vilawatt/>

[12] Vilawatt. Qué somos. Vilawatt hoy. [Consulta 19/03/2025] <https://vilawatt.cat/es/que->

som/vilawatt-hoy/

[13] Guidry, M. 2019. *Stars and Stellar Processes*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 182-184. ISBN: 978-1-107-19788-6.

[14] *Ibídem*, pp. 186-193.

[15] Eisberg, R. y Resnick, R. 2002. *Física cuántica*. Limusa Wiley, pp. 19-23. ISBN: 9789681804190

[16] *Ibídem*, p. 130.

[17] Young, H. D. y Freedman, R. A. 2020. *Sears and Zemansky's University Physics with Modern Physics*. 15th ed. Pearsons, pp. 1253-1257. ISBN: 978-0-1351-5955-2

[18] Kittel, C. 2005. *Introduction to Solid State Physics*. 8th. ed. Wiley: EEUU, pp. 163-181. ISBN: 0-471-41526-X

[19] Ashcroft, N. W. y Mermin, N. D. 1976. *Solid State Physics*. Saunders College Publishing: EEUU, pp. 221-223. ISBN: 0-03-083993-9

[20] Kittel, C. 2005. *Introduction to Solid State Physics*. 8th. ed. Wiley: EEUU, pp. 194-200. ISBN: 0-471-41526-X

[21] Ashcroft, N. W. y Mermin, N. D. 1976. *Solid State Physics*. Saunders College Publishing: EEUU, pp. 562-564. ISBN: 0-03-083993-9

[22] Kittel, C. 2005. *Introduction to Solid State Physics*. 8th. ed. Wiley: EEUU, pp. 209-212. ISBN: 0-471-41526-X

[23] Ashcroft, N. W. y Mermin, N. D. 1976. *Solid State Physics*. Saunders College Publishing: EEUU, pp. 590-591. ISBN: 0-03-083993-9

[24] *Ibídem*, pp. 598-600.

[25] Mertens, K. *Photovoltaics. Fundamentals, Technology and Practice*. 2nd. ed. Wiley: Munich, pp. 65-70. ISBN: 9781119401049

[26] *Ibídem*, pp. 96-98.

[27] *Ibídem*, pp. 73-77.

[28] CENER. Introducción a las microrredes. [Consulta 10/07/2025].

<https://www.cener.com/introduccion-a-las-microrredes/>

[29] Sun, W.; Ma, S.; Zhang, Y.; Jin, Y. y Alam, F. 2025. Multi-Energy-Microgrid Energy Management Strategy Optimisation Using Deep Learning. *Energies* **18**(3111), pp. 1-3. DOI: 10.3390/en18123111

[30] Arbab-Zavar, B.; García, E. J.; Vasquez, J. C. y Guerrero, J. M. 2019. Smart Inverters for Microgrid Applications: A Review. *Energies* **12**(5), pp. 3-12. DOI: 10.3390/en12050840

[31] Song, H.; Liu, C.; Amani, A. M.; Gu, M.; Jalili, M.; Meegahapola, L.; Yu, X. y Dickenson, G. 2024. Smart optimization in battery energy storage systems: An overview. *Energy and AI*, **17**(100378), pp. 1-12. DOI: 10.1016/j.egyai.2024.100378

[32] Poullikkas, A. 20213. A comparative overview of large-scale battery systems for electricity storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **27**, pp. 778-782. DOI: 10.1016/j.rser.2013.07.017

[33] Iqbal, M. Z.; Faisal M. M. y Ali S. R. 2021. Integration of supercapacitors and batteries towards high-performance hybrid energy storage devices. *Int. J. Energy Res.*, **45**, pp. 1449-1453. DOI: 10.1002/er.5954

[34] Zhang, Y.; Gao, Z.; Song, N. y Li, X. 2016. High-performance supercapacitors and batteries derived from activated banana-peel with porous structures. *Electrochimica Acta*, **222**, pp. 1257-1266. DOI: 10.1016/j.electacta.2016.11.099

[35] Prensa asociada. 2025. España dice que el apagón de abril se debió a fallos en la red y a una mala planificación, no a un ciberataque. *CNN España*, 17 de junio. [Consulta 10/07/2025].

<https://cnnespanol.cnn.com/2025/06/17/espana/apagon-fallos-red-ciberataque-ap>

[36] Álvarez, C. 2025. Por qué la mayoría de casas con placas solares se quedaron también sin electricidad en el apagón. *El País*, 29 de abril. [Consulta: 25/08/2025]. <https://elpais.com/clima-y-medio-ambiente/2025-04-29/por-que-la-mayoria-de-casas-con-placas-solares-se-quedaron-tambien-sin-electricidad-en-el-apagon.html>

[37] IDAE. 2002. *Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red*, Instalaciones de Energía Solar Fotovoltaica, pp. 13-17.

[38] Comunidad Energética Local Torrelavega. Nuestros edificios. [Consulta 01/07/2025]. <https://www.comunidadenergeticalocal.eu/proyectos/torrelavega/>

[39] Alonso, J. A. 2025. Eficiencia y rendimiento de placas solares. En: Sunfields Europe, 2 mayo. [Consulta: 12/07/2025]. <https://www.sfe-solar.com/paneles-solares/eficiencia-rendimiento/?srsltid=AfmBOopw9zkOk>

[40] Jinko Solar. JKM460-480N-60HL4-(V)-F1-EN. [Consulta: 01/08/2025]. [https://www.jinkosolar.com/uploads/JKM460-480N-60HL4-\(V\)-F1-EN.pdf](https://www.jinkosolar.com/uploads/JKM460-480N-60HL4-(V)-F1-EN.pdf)

- [41] European Comission. EU Science Hub. PVGIS. Herramientas interactivas. [Consulta: 11/07/2025]. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/
- [42] Iberdrola. Compromiso. Artículos por categorías. Cuántos kWh consume una casa al mes. [Consulta: 12/07/2025].
<https://www.iberdrola.es/blog/luz/cuantos-kwh-consume-una-casa-al-mes>
- [43] Ayuntamiento de Torrelavega. Inicio. Actualidad. Noticias. [Consulta: 14/07/2025].
<https://torrelavega.es/noticia/torrelavega-consolida-su-crecimiento-demografico/>
- [44] IDAE. 2002. *Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red*, Instalaciones de Energía Solar Fotovoltaica, p. 42.
- [45] IDAE. 2009. *Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Aisladas de Red*, Instalaciones de Energía Solar Fotovoltaica, p. 29.
- [46] Mertens, K. *Photovoltaics. Fundamentals, Technology and Practice*. 2nd. ed. Wiley: Munich, pp. 180-181. ISBN: 9781119401049
- [47] *Ibídem*, pp. 186-188.
- [48] Huawei. SUN2000-12/15/17/20/25KTL-M5. [Consulta: 09/08/2025].
<https://cdn.autosolar.es/pdf/Huawei-SUN2000-12-20KTL-M5-Trifasico-Ficha.pdf>
- [49] Mertens, K. *Photovoltaics. Fundamentals, Technology and Practice*. 2nd. ed. Wiley: Munich, p. 238. ISBN: 9781119401049
- [50] Castro, I. 2024. España duplica la pobreza energética de la UE: el 20 % de los hogares no pueden mantenerse calientes en invierno. *elDiario.es*, 11 de septiembre.[Consulta: 28/07/2025]. https://www.eldiario.es/economia/espana-duplica-pobreza-energetica-ue-20-no-mantener-casa-caliente-invierno_1_11646010.html
- [51] Cruz Roja. 2021. Actualidad. Ahora. Medio Ambiente. Hablemos de pobreza energética. [Consulta: 28/07/2025]. <https://www2.cruzroja.es/web/ahora/-/pobreza-energetica>
- [52] Ivančić, A. [et al.]. 2019. *Guía para el Desarrollo de Instrumentos de Fomento de Comunidades Energéticas Locales*. Documento de trabajo del IDAE, pp. 31-32. [Consulta: 13/07/2025].
https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/guia_para-desarrollo-instrumentos-fomento_comunidades_energeticas_locales_20032019.pdf
- [53] Gangoiti, J. 2025. «Llevamos años pidiendo más seguridad», reclama la aso-

ciación de vecinos de La Inmobiliaria. *El Diario Montañés*, 5 de febrero. [Consulta: 20/07/2025]. <https://www.eldiariomontanes.es/torrelavega/llevamos-anos-pidiendo-seguridad-reclama-asociacion-vecinos-20250205071616-nt.html>

[54] Chen, P.-H.; Chen, W.-S.; Lee, C.-H. y Wu, J.-Y. 2024. Comprehensive Review of Crystalline Silicon Solar Panel Recycling: From Historical Context to Advanced Techniques. *Sustainability*, **16**(1), artículo 60, pp. 1-11. DOI: 10.3390/su16010060

[55] Ibáñez de Aldecoa Quintana, J. M. 2022. Una aproximación preliminar al límite de la tecnología de silicio. *Economía industrial*, **426**, pp. 155-158. ISSN: 0422-2784

[56] Zhang, J.; Chen, C.; Zhang, X. y Liu, S. 2016. Study on the Environmental Risk Assessment of Lead-Acid Batteries. *Procedia Enviromental Sciences*, **31**, pp. 873-879. DOI: 10.1016/j.proenv.2016.02.103

[57] Kelektoglou, K.; Karali, D.; Stavridis, A. y Loupa, G. 2018. Efficiency of the Air Pollution Control System of a Lead-Acid-Battery Recycling Industry. *Energies* **11**(12), pp. 1-9. DOI: 10.3390/en11123465

[58] Zhou, J.; Du, B.; Wang, Z.; Zhang, W.; Xu, L.; Fan, X.; Liu, X. y Zhou, J. 2019. Distributions and pools of lead (Pb) in a terrestrial forest ecosystem with highly elevated atmospheric Pb deposition and ecological risks to insects. *Science of The Total Environment*, **647**, pp. 932-940. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.091

[59] Mrozic, W.; Rajaeifar, M. A.; Heidrich, O. y Christensen, P. 2021. Environmental impacts, pollution sources and pathways of spent lithium-ion batteries. *Energy Environ. Sci.*, **14**, pp. 6099- 6108. DOI: 10.1039/D1EE00691F

[60] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Calidad y evaluación ambiental. Temas. Prevención y gestión de residuos. Glosario: flujos de residuos. R. Domésticos. Fracciones. Pilas y acumuladores. [Consulta: 24/07/2025]. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/fracciones/pilas-y-acumuladores/como-se-tratan-pilas-y-acumuladores-2022.html>

[61] Gasca, M. V.; Rigo-Mariani, R.; Debusschere, V. y Sidqi, S. 2025. Energy communities typologies and performances: Impact of members configurations, system size and management. *Energy Reports*, **14**, pp. 173-181.

DOI: 10.1016/j.egyr.2025.05.049