

Autoconsumo y comunidades energéticas

Manuel Pérez Bravo y Tomás Gómez San Román

Instituto de Investigación Tecnológica (IIT), ETS ICAI,
Universidad Pontificia Comillas

1. Introducción

Con el objetivo de responder a los desafíos planteados por el cambio climático, el Pacto Verde Europeo (Consejo de la Unión Europea, 2024c), a través de los múltiples paquetes de medidas que se han ido sucediendo desde su elaboración en 2019, ha diseñado numerosas políticas e instrumentos para mitigar y adaptarse a sus efectos. El paquete *Fit For 55* (Consejo de la Unión Europea, 2024b, p. 55) define el objetivo de reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) del 55 % en 2030 respecto a los niveles de 1990, y la neutralidad climática en 2050.

Entre los diferentes sectores que contribuyen a las emisiones de GEI, el sector energético¹, en Europa, es el responsable de más del 75 % de las mismas, por lo que este sector es central en las políticas de transición hacia la neutralidad climática. Para reducir las emisiones derivadas de este sector, se puede reducir el consumo mediante el aumento de la eficiencia energética en los usos finales, y aumentar el porcentaje de energía renovable en el total de

¹ Las emisiones del sector energético comprenden todas aquellas emisiones derivadas de la combustión para la transformación energética, es decir, incluye: las industrias energéticas (producción eléctrica, refinería y producción de combustibles sólidos), la industria manufacturera, el transporte, y otros sectores como el residencial, comercial, o la agricultura.

la energía consumida. Con este objetivo, la Unión Europea ha establecido en la Directiva de Energía Renovable (RED III) (Parlamento y Consejo Europeos, 2024), y como resultado del Plan RepowerEU (European Comission, 2022), un objetivo de aumentar el porcentaje de energía renovable (en todos los sectores) hasta al menos el 42,5 % del consumo final bruto de energía.

En Europa, las industrias energéticas contribuyen al 24 % de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), mientras que en España representan el 22 %, aunque el transporte doméstico es el principal emisor desde 2015 gracias a la alta penetración de energías renovables, que alcanzó un 52 % del mix eléctrico en 2023. España, junto con países como Dinamarca y Portugal, supera la media europea en generación renovable, mientras que naciones como Polonia y Bélgica mantienen a las industrias energéticas como mayores emisores. Para cumplir con los objetivos de descarbonización, el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) fija metas ambiciosas, como electrificar el 35 % del consumo energético final y alcanzar un 81 % de renovables en el mix eléctrico para 2030, destacando la electrificación como clave en sectores como transporte, industria y residencial, donde la eficiencia y el despliegue de tecnologías como las bombas de calor pueden reducir el consumo energético total y aumentar la sostenibilidad.

Sin embargo, para alcanzar niveles de penetración de renovables tan altos como este, es necesario cambiar no únicamente la forma en la que se genera la energía eléctrica, sino también la forma en la que se consume. Las fuentes de energía eléctrica renovable son variables durante el día y a lo largo de las estaciones, por lo que la introducción de flexibilidad en el sistema, tanto en el lado de la demanda como en instalaciones de almacenamiento de energía para equilibrar la generación y el consumo, es el primer paso para poder seguir expandiendo de forma segura la capacidad de generación.

Puesto que los costes de inversión en activos de generación renovable han ido decreciendo exponencialmente en los últimos años (IRENA, 2024), y su disponibilidad en tamaños reducidos también resulta competitiva, especialmente la solar fotovoltaica, los recursos energéticos distribuidos (RED)² están hoy en día al alcance no solo de los generadores entendidos en el sentido tradicional, es decir, empresas con grandes capacidades de generación y un portfolio variado, sino también en manos de los propios consumidores. Estos consumidores pasan a ser prosumidores, ya que tienen tanto la capacidad de consumir como de producir energía e injectarla al sistema. Gracias a los RED, los prosumidores pueden por una parte protegerse frente a precios altos de mercado en momentos en los que la generación basada en combustibles fósiles con costes más elevados marquen dichos precios. En segundo lugar, pueden también ahorrar en costes de red en los que no incurren cuando consumen energía procedente de RED localizados en la proximidad de dicho consumo, y en tercer lugar, los prosumidores con RED disponen de una mayor autonomía e independencia con respecto a la energía que autoconsumen de sus propias fuentes generadoras. Desde el punto de vista del sistema, los

² Los recursos energéticos distribuidos (RED) son fuentes de energía a pequeña escala, generalmente ubicadas cerca de los puntos de consumo de electricidad, como paneles solares en tejados y sistemas de almacenamiento en baterías. Su rápida expansión está transformando no solo la forma en que se genera la electricidad, sino también cómo se comercializa, distribuye y consume.

RED de los prosumidores, además de otorgar mayor flexibilidad en la operación, aportando seguridad y estabilidad de red, cumplen la función de aumentar la penetración de energías renovables en el consumo bruto final de energía, y aumentan la independencia energética al basarse en fuentes autóctonas de generación. Es por ello que el PNIEC establece un objetivo de autoconsumo energético de 19 GW instalados en 2030, que cubrirá el 11 % de la demanda de energía eléctrica.

A finales de la década, con el despliegue esperado de las renovables en el sistema, los precios de mercado podrían seguir una trayectoria descendente, especialmente en las horas diarias de coincidencia en la producción solar. Este escenario podría reducir el atractivo económico de los RED para los prosumidores basados únicamente en la producción de energía solar para autoconsumo, y abrir la ventana de oportunidad para el almacenamiento eléctrico, aprovechando también la pronosticada bajada de sus costes de inversión, que permitirá revalorizar la energía e ir un paso más allá aportando flexibilidad al sistema. El almacenamiento permite desplazar durante el día la producción de los RED, aumentando así la ratio de autoconsumo y, teniendo la energía autoproducida un coste menor a la de red, reducir el gasto energético aún más. De nuevo, desde el punto de vista del sistema, el almacenamiento no solo aporta flexibilidad aprovechando la generación renovable variable, sino que también reduce los picos de demanda.

Finalmente, estos activos de generación y de almacenamiento no serán de uso exclusivo de los prosumidores de forma individual. De hecho, el coste de inversión en RED se ve beneficiado de economías de escala, por lo que activos compartidos de mayor tamaño resultarán en precios de la energía aún más competitivos. Además, el espacio para instalar estos RED puede ser de propiedad común a varios prosumidores, por lo que tiene sentido compartir también sus beneficios. Es así como nacen los diferentes esquemas de autoconsumo colectivo, donde los prosumidores invierten y gestionan instalaciones comunes de mayor escala y de uso compartido. En España, el Real Decreto que regula el funcionamiento de los esquemas de autoconsumo es el 244/2019, de 5 de abril, donde se definen las figuras y las condiciones para poder disfrutar de las diferentes exenciones y beneficios relacionados con estas figuras.

De manera independiente pero estrechamente relacionada, la necesidad de crear una mayor concienciación de los ciudadanos y acercar la gestión y gobernanza de la energía a los mismos, ha hecho surgir políticas y legislación que proponen diferentes esquemas de asociación, conocidas comúnmente como Comunidades Energéticas (CE). Sin embargo, las CE no implican necesariamente esquemas de autoconsumo colectivo, pueden limitarse a la generación y comercialización de energía en localizaciones diferentes a las de sus prosumidores. Existen varias figuras legales en la regulación europea y española alrededor del autoconsumo individual o colectivo, y de las CE. En concreto, el Proyecto de Real Decreto por el que se desarrollan las figuras de las comunidades de energías renovables y las comunidades ciudadanas de energía transpone las Directivas (UE) 2018/2001 y en especial, la 2019/944. Este Proyecto de Real Decreto cerró su periodo de consulta en mayo de 2023 y se encuentra pendiente de aprobación.

En resumen, estos diferentes esquemas de autoconsumo y de implicación ciudadana en torno a la energía pueden conllevar beneficios económicos, sociales y medioambientales para los propios consumidores y para el sistema eléctrico en su totalidad. Sin embargo, es importante conocer sus ámbitos y restricciones de aplicación legal, así como las condiciones que hacen que puedan llegar a ser proyectos competitivos en función de las características territoriales y demográficas de cada caso, ya que pueden tener un rango de actuación con delimitación geográfica acotada.

Este capítulo se divide en 3 subcapítulos además de la Introducción. El subcapítulo 2 describe los diferentes modelos de autoconsumo y comunidades energéticas posibles, tanto en Europa como en España, aportando reflexiones sobre el atractivo, pero también sobre las barreras regulatorias que cada uno de ellos presenta. El subcapítulo 3 proporciona una visión actualizada del desarrollo de estas figuras de autoconsumo y comunidades energéticas, de nuevo comparando el panorama nacional con el internacional. Por último, el subcapítulo 4 recoge algunas de las reflexiones al respecto de estos modelos.

2. Modelos de Autoconsumo y de Comunidades Energéticas

2.1. Autoconsumo individual y colectivo

El Real Decreto 244/2019, de 5 de abril, regula las condiciones para el autoconsumo de electricidad, en desarrollo del artículo 9 de la Ley 24/2013, del Sector Eléctrico. Para ser considerado autoconsumo, según el Real Decreto, la instalación de producción debe estar conectada a menos de 500 metros de las instalaciones de consumo. Sin embargo, el Real Decreto-ley 18/2022 y el Real Decreto-ley 20/2022 amplían esta distancia a 1 y 2 km, respectivamente, siempre que la planta de generación sea fotovoltaica y se ubique en cubiertas, suelos industriales o estructuras artificiales cuyo fin principal no sea generar electricidad.

Los beneficios para un consumidor con autoconsumo van más allá de disponer de energía gratuita generada por su propia instalación. El autoconsumo también aporta unos ciertos ahorros en el término volumétrico (variable) de los peajes y cargos por energía, ya que según el artículo 9.5 de la Ley 24/2013, la energía renovable de autoconsumo está exenta de peajes y cargos. Si bien el consumidor continuará pagando el mismo término fijo de peajes y cargos por potencia contratada, podría reducir su potencia contratada en el caso de contar con almacenamiento suficiente, por lo que la instalación de autoconsumo podría aportarle incluso ahorros en el término fijo de peajes y cargos.

Además, en el caso de adherirse a un esquema de autoconsumo con excedentes, el consumidor podría obtener una serie de descuentos en su factura o beneficios económicos de la venta de su energía excedentaria a la red. Dentro de las figuras de autoconsumo, existen esquemas tanto con excedentes como sin excedentes. Dentro de los esquemas con excedentes, la compensación de la energía excedentaria puede estar sujeta a compensación simplificada

o no. La compensación simplifica conlleva un descuento en el término variable de energía en la factura eléctrica del consumidor, en función de la energía vertida a red (con un límite). Para acogerse a este esquema, la instalación ha de cumplir varios requisitos recogidos en el Real Decreto, entre los que destacan que la energía sea únicamente de origen renovable y que la instalación tenga una capacidad menor a 100 kW. Un esquema sin compensación simplificada implicaría para el prosumidor establecer un contrato de representación en el mercado a través de una comercializadora, o bien darse de alta como productor en el Registro Administrativo de Instalaciones de Producción de Energía Eléctrica (RAIPRE), además de cumplir con las obligaciones fiscales y tributarias propias de una actividad económica. Esta segunda opción está normalmente asociada a grandes instalaciones de producción que quieran participar en el mercado para así obtener un beneficio económico, no tanto para los prosumidores con una instalación de autoconsumo cuyo principal objetivo es reducir la factura eléctrica. Cabe destacar que estos excedentes de la energía generada se tratan de la misma forma que la energía de otras instalaciones, por lo que están exentos del pago de peajes y cargos por inyectar a la red.

La Figura 1 resume las implicaciones en cuanto a los pagos por energía, peajes y cargos, en los diferentes posibles flujos de energía que pueden tener lugar dentro de un esquema de autoconsumo individual.

Figura 1. Pago de peajes y cargos en los diferentes flujos de energía posibles en un esquema de autoconsumo

Posibles flujo de energía en el esquema de autoconsumo individual	Consideraciones sobre la energía, peajes y cargos
El consumidor utiliza energía producida por su instalación de generación distribuida, con o sin almacenamiento.	<p>El consumidor no paga por la energía producida por su propia instalación. Esta energía puede haber sido anteriormente almacenada en la batería en caso de disponer de ella.</p> <p>El consumidor no paga el término volumétrico de peajes y cargos por la energía de autoconsumo. Sin embargo, si continúa pagando el término fijo de peajes y cargos por la potencia instalada, aunque de disponer de almacenamiento podría reducir su potencia contratada reduciendo así este pago.</p>
El consumidor consume energía de la red cuando su propia instalación de generación distribuida no está produciendo suficiente energía, y el almacenamiento está también vacío.	<p>El consumidor paga por la energía consumida de la red al precio contratado con su comercializadora.</p> <p>El consumidor paga tanto término fijo como variable (volumétrico) de peajes y cargos por la energía consumida de la red.</p>
Cuando la instalación de generación distribuida está produciendo una energía que no se consume por el consumidor ni por su sistema de almacenamiento (porque esté lleno), a esta energía se le considera excedente. Esta energía puede ser vertida a red en el caso de estar acogido a un esquema de autoconsumo con excedentes.	<p>De estar adscrito a un esquema de autoconsumo con compensación simplificada de excedentes, el consumidor recibe un descuento en su factura por la energía vendida a la red.</p> <p>En el caso de estar adscrito a un esquema de autoconsumo sin compensación simplificada, esta energía se venderá en mercado a través de la representación de su comercializadora, o habiéndose declarado productor.</p> <p>La energía inyectada en la red no paga peajes ni cargos.</p>

Bajo la estructura de peajes y cargos vigente en 2024, un prosumidor (en nivel de tensión NT0, grupo tarifario 2.0 TD) podría ahorrar por la energía autoconsumida (sumando ambos términos variables, volumétricos) desde 0,002752 €/kWh (Periodo 3) hasta 0,076974 €/kWh (Período 1), lo cual puede representar una parte importante del coste total de la energía eléctrica. Para precios de mercado en los que el PVPC se sitúe en torno a 0,1 €/kWh, la reducción de peajes y cargos podría suponer un ahorro equivalente de entre el 50 % y el 75 % del término de energía en la factura.

Para las instalaciones de autoconsumo colectivo, las condiciones de aplicación son las mismas que para el autoconsumo individual, teniendo que estar todos los consumos adscritos al esquema a una distancia menor a la indicada del RED compartido. De conformidad con el Real Decreto 244/2019, para que se entienda que la instalación de producción está próxima a las de consumo y asociada a las mismas ha de estar conectada a una distancia inferior a 500 metros de los consumidores asociados.

Además, existe una particularidad en las instalaciones de autoconsumo colectivo, la forma de repartir la energía autoproducida por el RED compartido. En el Real Decreto 244/2019, el Anexo I describe la metodología de cálculo de las energías y potencias a efectos de facturación y liquidación para el autoconsumo colectivo o asociado a una instalación a través de red. En la actualidad, este Anexo I solo contempla utilizar coeficientes de reparto fijos, es decir, una asignación constante a cada consumidor durante todas las horas del día. Sin embargo, para una gestión todavía más eficiente, capaz de considerar los diferentes patrones de consumo de los consumidores asociados y maximizar la ratio de autoconsumo en la instalación, la misma Disposición final quinta del Real Decreto deja abierta la puerta a la modificación hacia coeficientes de reparto dinámicos mediante Orden Ministerial.

Una vez analizados los modelos de autoconsumo individual y colectivo, es también importante analizar el atractivo económico de los mismos. El coste nivelado de la energía (LCOE, por sus siglas en inglés) es la métrica definida como el coste medio de la generación de energía a lo largo de la vida útil de un activo de generación. Esta métrica nos es útil para comparar precios de la energía generada entre diferentes activos y poder compararla con los precios esperados en el mercado eléctrico. Según el último estudio sobre LCOE de las tecnologías energéticas elaborado por el Instituto Fraunhofer (Fraunhofer, 2021), en un país como España, el LCOE de la generación solar distribuida, con o sin almacenamiento asociado, puede estar entre 5-30 c€/kWh, es decir 50-300 €/MWh. Como referencia, los precios del término de facturación de la energía consumida por un consumidor acogido a la tarifa regulada de pequeños consumidores, por debajo de 10 kW, (PVPC) con tarifa de acceso 2.0TD, han oscilado entre 85-400 €/MWh entre 2021 y 2024 (sin peajes ni cargos). Los precios más elevados se dieron durante la crisis energética coincidiendo con la invasión rusa de Ucrania como se puede observar en la Figura 2.

Figura 2.

Término de facturación de energía activa del PVPC 2.0TD (media mensual)

Fuente: elaboración propia
a partir de ESIOS (2024).

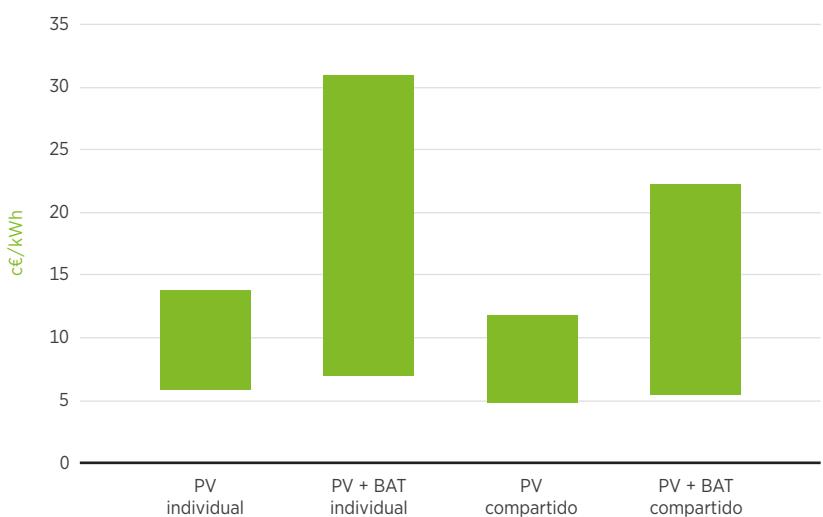


Como vemos en la Figura 3 dado que un sistema de generación solar fotovoltaica con almacenamiento (PV+BAT) tiene un mayor coste de inversión, su LCOE es normalmente mayor que el LCOE de un sistema de generación solar fotovoltaica (PV) sin almacenamiento. Sin embargo, la energía provista por el sistema de autoconsumo con almacenamiento puede seguir teniendo un precio por debajo del precio de la tarifa regulada PVPC (incluyendo peajes y cargos³, de los cuales el autoconsumo estaría exento) si el sistema está diseñado de forma que el LCOE sea cercano al extremo inferior del rango, además de aumentar considerablemente la cantidad de energía autoconsumida, por lo que el precio medio de la energía será finalmente menor en un sistema con almacenamiento a condición de que su LCOE esté por debajo del precio de energía de compra de la red, en nuestro ejemplo el precio de la tarifa PVPC.

Figura 3.

LCOE de los diferentes sistemas de autoconsumo posible para un país con alta radiación solar como España

Fuente: elaboración propia
a partir de Fraunhofer (2021).



³ Se supone que el término de potencia se mantiene inalterado, aunque un prosumidor con almacenamiento podría reducir su término de potencia.

Es decir, un sistema con o sin almacenamiento diseñado de forma que el LCOE esté por debajo del precio de compra en el mercado siempre tendrá beneficios para el consumidor respecto a comprar su energía de la red, beneficios a los que hay que sumar los ahorros aportados por el término variable de peajes y cargos. Además, un sistema con almacenamiento aporta ahorros extra derivados de una mayor cobertura del autoconsumo sobre la energía total consumida, por lo que puede reducir aún más el precio medio de la energía para el consumidor.

Sin embargo, el almacenamiento tiene hoy en día ciertas restricciones regulatorias a su funcionamiento dentro de los esquemas de autoconsumo contemplados en la legislación española:

- Los consumidores adheridos a un esquema de autoconsumo individual cuya instalación de conexión interna no utilice la red pública sí pueden reducir su término de potencia (término fijo de potencia contratada de peajes y cargos) en el caso de utilizar la batería durante los picos de demanda, ya que el flujo de energía y potencia entre el RED y el consumidor no es registrada por el contador. Sin embargo, los consumidores adheridos a un esquema de autoconsumo colectivo que utilicen la red pública (esquema más comúnmente utilizado) no pueden reducir su término de potencia, incluso si fueran capaces de utilizar la batería durante los picos de demanda, ya que la asignación de la energía producida por el RED es la que sólo se resta en los contadores individuales, pero la potencia medida por los contadores individuales no se reduce. Según el RD 244/2019 (art. 3.b), se factura la potencia con el equipo de medida del consumidor (solo se reparte, utilizando los coeficientes de reparto, la energía producida entre los consumidores y se descuenta a posteriori).
- Los consumidores adheridos a autoconsumo no pueden optimizar el uso de sus baterías almacenando energía de la red cuando los precios de mercado son bajos por una alta penetración de renovables, para utilizarla más tarde cuando los precios de mercado sean altos, ya que las baterías en un esquema de autoconsumo están ligadas a la producción excedentaria de la generación distribuida. Tampoco pueden utilizar su batería para almacenar energía de red para venderla luego al sistema cuando los precios son altos, lo que es comúnmente conocido como «arbitraje de precios». Cualquiera de estas dos opciones podría ayudar a amortizar el sistema de almacenamiento haciendo que se reduzca el LCOE medio para el consumidor aún más.
- En España, los consumidores que utilizan sistemas de autoconsumo no tienen la posibilidad de emplear sus baterías para ofrecer servicios de balance, lo que podría ser una fuente adicional de ingresos. Para participar en estos servicios, es necesario estar registrado como una unidad de programación de generación o demanda, con una capacidad mínima de 1 MW. Si se permitiera que los sistemas de almacenamiento accedieran a los mercados de balance, esto podría hacer que el autoconsumo fuera más atractivo para los consumidores y mejorar la eficiencia del sistema.

Por último, cabe destacar que los esquemas de autoconsumo tanto individual como colectivo no tienen por qué limitarse a las baterías estacionarias del lado del cliente, sino que también podemos considerar como sistemas de almacenamiento las baterías de los vehículos eléctricos, las cuales no contribuyen en coste de inversión al LCOE (ya que la inversión se hizo con una intención diferente a la del almacenamiento eléctrico) y proveen por lo tanto de un coste de la energía más bajo. En este caso, se pueden distinguir dos casos de uso. En el primero, la gestión de la carga del vehículo integrada con la instalación de autoconsumo permite mejorar las ratios de la energía autoconsumida y por tanto reducir el coste de la energía para el usuario. En el segundo caso, se podría incluso disponer de la energía almacenada en la batería para devolverla a la red en horas de precios altos (si estuviera habilitado el *Vehicle-To-Grid* o V2G), o reducir el consumo propio de la instalación. En este último caso, son los fabricantes de los vehículos eléctricos y los sistemas de recarga los que deben permitir poder inyectar la energía desde la batería a las instalaciones del consumidor y en su caso a la red.

2.2. Comunidades Energéticas

Las comunidades energéticas se han de entender como esquemas organizativos que permiten las acciones colectivas para gestionar energía y lideradas por la ciudadanía para impulsar la transición hacia una energía limpia. Las comunidades no deben entenderse únicamente como una extensión de los esquemas de autoconsumo colectivos anteriormente analizados.

Uno de sus objetivos es favorecer una mayor aceptación pública de los proyectos de energía renovable y facilitar la atracción de la inversión privada, por lo que pueden tomar diferentes formas que incluyen o no generación distribuida. A ojos del ciudadano, las comunidades energéticas pueden empoderar y otorgar soberanía sobre la energía, así como concienciar sobre el uso y producción de la energía y en último término permitir reducir la factura energética de sus asociados. Adicionalmente, la instalación de RED en comunidades energéticas puede, al igual que en los esquemas de autoconsumo, generar empleo en torno a la transición energética.

La regulación europea no tiene una única definición de comunidad energética, sino que, a través de tres normativas diferentes, define dos figuras: la Comunidad Ciudadana de Energía (CCE), y la Comunidad de Energía Renovable (CER). La CCE queda definida en la Directiva 2019/944 sobre las normas comunes para el mercado interior de la electricidad, mientras la CER está definida tanto en la Directiva 2018/2001 de fomento de uso de energía procedente de fuentes renovables, como en el Reglamento 2018/1999 sobre la gobernanza de la Unión de la Energía y de la Acción por el Clima. Para empezar, es importante remarcar que todas estas legislaciones requieren que los ciudadanos se inscriban como entidad jurídica para poder formar una CCE o CER, a diferencia de los esquemas de autoconsumo individual o colectivo en los que los consumidores involucrados no tienen por qué constituirse como una figura legal al efecto.

El marco regulatorio de las Comunidades de Energías Renovables (CER) se encuentra principalmente desarrollado en los artículos 2 y 22 de la Directiva 2018/2001. También se incluyen obligaciones específicas para los estados miembros en cuanto a información y capacitación

que deben proporcionar al respecto. En general, las CER son entidades legales autónomas formadas por personas físicas, pequeñas y medianas empresas (pymes), autoridades locales o municipios, ubicados cerca de proyectos de energía renovable. La participación en la CER es voluntaria y abierta, y su propósito principal es generar beneficios ambientales, económicos o sociales para sus miembros o las comunidades locales donde operan, en lugar de obtener beneficios financieros. Estas comunidades trabajan exclusivamente con energías renovables (no tienen por qué limitarse a la energía eléctrica) y pueden involucrarse en actividades como la producción, consumo, almacenamiento, venta y compartición de energía. Además, su acceso a los mercados energéticos debe ser garantizado tanto de manera individual por cada miembro como agregada, y la participación como miembros debe ser accesible incluso para hogares de bajos ingresos o en situación de vulnerabilidad.

Las Comunidades Ciudadanas de Energía (CCE) presentan un marco regulatorio distinto al de las Comunidades de Energías Renovables (CER), ya que están reguladas principalmente por la Directiva 2019/944, que se centra exclusivamente en el sector eléctrico. A diferencia de las CER, las CCE tienen un ámbito más amplio en cuanto a las actividades permitidas dentro del sector eléctrico, incluyendo no solo la generación, consumo y almacenamiento de electricidad, sino también distribución, suministro, servicios de eficiencia energética, carga de vehículos eléctricos y otras actividades relacionadas. Mientras que las CER se enfocan únicamente en energías renovables, las CCE pueden trabajar con cualquier tipo de actividad o servicio, pero solo con electricidad, siempre que cumplan con los principios establecidos en su marco normativo. Además, las CCE tienen la posibilidad de gestionar y operar redes de distribución eléctrica en sus áreas de actividad, lo que implica responsabilidades adicionales como la compra de energía bajo condiciones de mercado transparente y no discriminatorio, el desarrollo de planes de expansión de la red y el establecimiento de acuerdos con los gestores de las redes de distribución (GRD) o de transporte (GRT) correspondientes.

Otra diferencia importante radica en los derechos y obligaciones específicas de las CCE en relación con la red eléctrica. Los estados miembros deben garantizar el pago de tarifas justas, no discriminatorias y basadas en costes tanto para la electricidad que las CCE inyectan como para la que consumen de la red. Además, los estados miembros deben asegurar procedimientos y cargos transparentes y proporcionales, y las autoridades regulatorias tienen el deber de supervisar que no existan obstáculos injustificados para el desarrollo de estas comunidades.

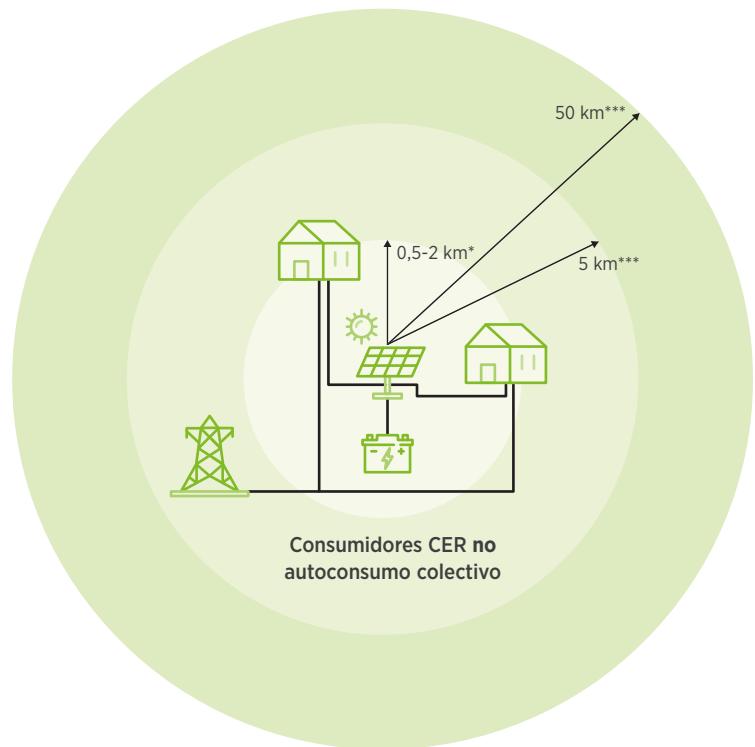
Por último, el propósito principal de las CCE, al igual que el de las CER, es generar beneficios ambientales, sociales o económicos para sus miembros y las comunidades locales donde operan, en lugar de perseguir ganancias financieras. No obstante, su marco regulatorio les otorga mayor flexibilidad en términos de actividades y posibilidades de participación en el sistema eléctrico, lo que las convierte en una herramienta clave para democratizar el acceso a la energía y fomentar una transición energética inclusiva.

En la legislación española, ninguna de estas dos figuras ha sido todavía desarrollada, únicamente se han transpuesto de forma literal en la Ley del Sector Eléctrico (Ministerio de la Presidencia, Justicia y Relaciones con las Cortes, 2013). Existe un Proyecto de Real Decreto (PRD) en el que se propone una definición legal tanto de las CER como de las CCE. En cuanto

a las CER, se definen diferentes límites a la proximidad entre los recursos de producción de energía renovable y sus miembros para poder constituirse como tal, en función de la población del municipio donde habitan los consumidores, de hasta 5 km. Por otra parte, la Orden TED/1446/2021, de 22 de diciembre, fija el límite de proximidad de los proyectos singulares de comunidades energéticas en 50 km² (Orden TED/1446/2021, de 22 de diciembre, por la que se aprueban las bases reguladoras para la concesión de ayudas del programa de incentivos a proyectos piloto singulares de comunidades energéticas (Programa CE Implementa), en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, 2021).

Sin embargo, el autoconsumo colectivo, tal y como está definido en el Real Decreto 244/2019, no contempla de momento aumentar el límite de proximidad más allá de los 2 km alrededor de los activos de generación. Por lo tanto, aquellos consumidores adscritos a una CER y situados a menos de 2 km de los activos de generación de la comunidad podrán adscribirse también al esquema de autoconsumo colectivo con compensación simplificada de excedentes (Figura 4). Por lo contrario, aquellos consumidores situados entre 2 y 5 km desde los activos de generación de la comunidad, podrán ser parte de la comunidad según este Proyecto de Real Decreto, pero no podrán formar parte del esquema de autoconsumo colectivo, y no experimentarán la exención de peajes y cargos asociada (todo ello sin perjuicio de que el Gobierno, en el futuro, decidiera extender esa exención hasta los 5 kilómetros u otra distancia).

Figura 4.
Alcance de los
diferentes esquemas de
autoconsumo colectivo y
comunidades energéticas
según la regulación



* RD 244/2019, de 5 de abril
Ampliado a 2.000 en
RD-ley 20/2022, de 27 de diciembre,
bajo ciertas condiciones.

** Proyecto de Real Decreto.

*** Orden TED/1446/2021,
de 22 de diciembre
(Bases reguladoras
del Programa CE Implementa).

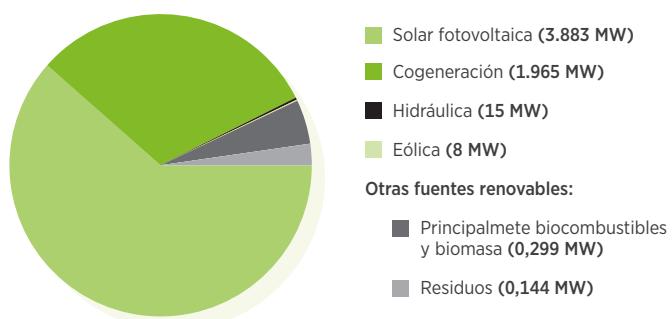
Entre los derechos de las CER definidos en este PRD destacan la posibilidad de generar y consumir su propia energía, vender excedentes, y acceder a los mercados energéticos. En el caso de las CCE, tienen derecho a operar en mercados eléctricos bajo condiciones no discriminatorias y actuar como representantes de consumidores para autoconsumo colectivo. Pero la falta de aprobación del futuro Real Decreto limita su potencial desarrollo en la actualidad, sobre todo en aspectos clave como el acceso a redes eléctricas y la definición clara de peajes y cargos.

Asimismo, el texto del PRD no resuelve si las grandes empresas energéticas pueden formar parte de estas comunidades, aunque parece limitar su influencia a la gestión. También carece de claridad sobre quién puede actuar como comercializador dentro de una comunidad, lo que dificulta la operación en mercados eléctricos. Por último, se subraya la necesidad de garantizar el acceso efectivo a las redes eléctricas, algo identificado como una de las principales barreras por el Consejo de Ministros de Energía de la UE (Consejo de la Unión Europea, 2024a). Este acceso es esencial para que las comunidades puedan operar en igualdad de condiciones con otros actores del mercado.

3. Desarrollo del Autoconsumo y las Comunidades Energéticas en España

En España, los últimos datos disponibles sobre el autoconsumo están recogidos en el Informe Sobre las Conclusiones de la Mesa de Diálogo de Autoconsumo (INF/DE/10/24) organizada por la CNMC en julio de 2024 (CNMC, 2024). En este Informe se concentran los principales datos sobre el autoconsumo en nuestro país. En estos datos podemos ver cómo la mayoría de la capacidad instalada en autoconsumo es de tecnología solar fotovoltaica (3,9 GW), seguida por la cogeneración (1,9 GW), otras fuentes renovables (0,3 GW), residuos (0,1 GW), hidráulica (15 MW), y, por último, eólica (8 MW).

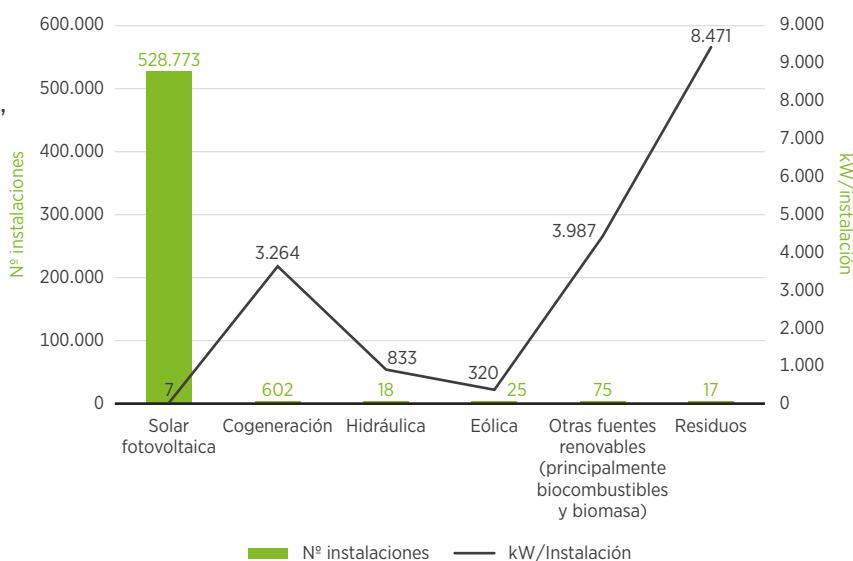
Figura 5.
Capacidad de autoconsumo instalada en España
Fuente: elaboración propia a partir de CNMC (2024).



En número de instalaciones, la solar fotovoltaica ocupa el 99,9 % de las instalaciones de autoconsumo, con la capacidad media por instalación más pequeña de todas las tecnologías, alrededor de 7 kW por instalación. Las instalaciones de cogeneración (602) tienen una media

de potencia instalada de 3,2 MW, inferior a la capacidad media de las instalaciones de residuos (8,5 MW) y de otras fuentes renovables (4 MW).

Figura 6.
Instalaciones de autoconsumo en España, en número y capacidad media
Fuente: elaboración propia a partir de CNMC (2024).



En cuanto a la modalidad de autoconsumo a la que están adheridas las instalaciones, un 98 % de las instalaciones son con excedentes y acogidas a compensación. Solo un 1,7 % son esquemas sin excedentes, y menos de un 0,4 % son instalaciones con excedentes sin compensación. Sin embargo, si dividimos por potencia instalada, las instalaciones con excedentes acogidas a esquemas con compensación representan tan solo el 48 % de la potencia, el 42 % corresponde a esquemas con excedentes sin compensación, y el 10 % a esquemas sin excedentes. Estos datos indican que la mayoría de las instalaciones solares fotovoltaicas son con excedentes y acogidas a compensación.

Sobre el desarrollo del autoconsumo colectivo, tan solo el 0,84 % de la capacidad instalada en autoconsumo corresponde a instalaciones de autoconsumo colectivo, es decir, la amplia mayoría de instalaciones (en número) son instalaciones de autoconsumo individual. En instalaciones por hogar, un 6,3 % de los hogares tendría una instalación de autoconsumo, 4,8 % en autoconsumo individual, y 1,5 % en autoconsumo colectivo.

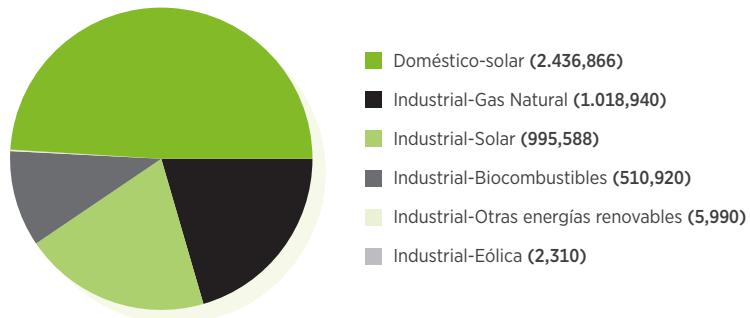
Sobre el total de la potencia instalada de generación en España a cierre del año 2023, 125.620 MW (Red Eléctrica, 2024), la potencia instalada en autoconsumo (6.314 MW) correspondía al 5 % a nivel nacional. Sin embargo, siendo en su mayoría instalaciones con una producción variable en función de la meteorología y unos rendimientos normalmente menores a las instalaciones de gran escala, su producción anual reportada a Eurostat sería de unos 5.000 GWh, repartidos principalmente entre la producción solar de los hogares (49 %), la producción solar de la industria (20 %), la producción a partir de gas natural en industria (a partir de fuentes renovables y residuos, 20 %), y la producción a partir de biocombustibles

en industria (10 %). Comparados con el total de energía eléctrica demandada en España en 2023 (266.807 GWh), el autoconsumo cubre alrededor de un 2 % de la demanda nacional de energía eléctrica.

Figura 7.

Energía de autoconsumo en España

Fuente: elaboración propia a partir de la CNMC (2024).



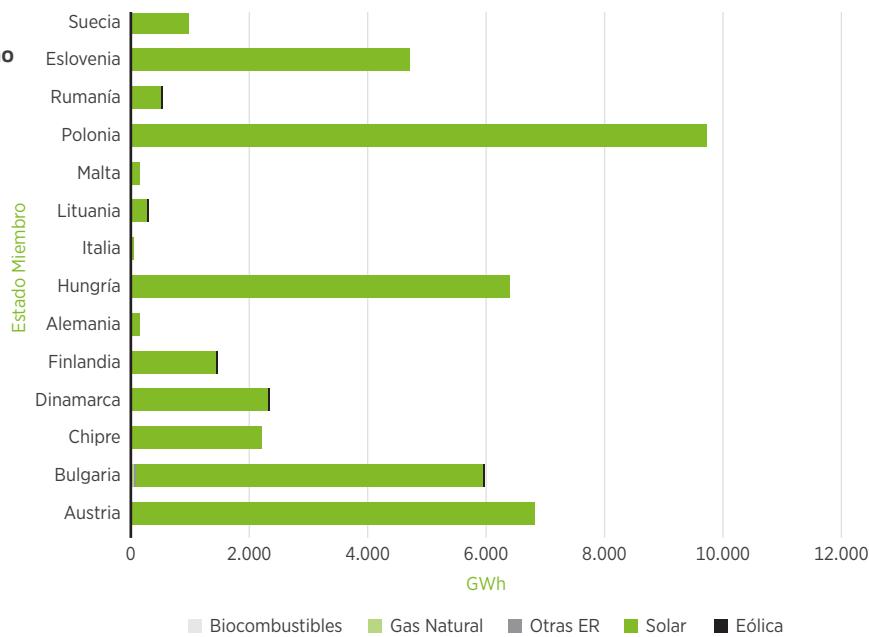
A nivel de la Unión Europea, España se situaba en 2022 como cuarto país con mayor cantidad de energía renovable de autoconsumo en hogares (Figura 8), solo por detrás de Países Bajos, Italia y Bélgica (Eurostat, 2024). En todos los países de la Unión, excepto una pequeña cantidad de gas natural a partir de fuentes renovables en Bélgica, la solar fotovoltaica acapara el total del autoconsumo en hogares. En el ámbito industrial, España se situaba como segundo país con mayor cantidad de energía de autoconsumo, solo por detrás de Italia (Figura 9). Sin embargo, en el ámbito industrial son las instalaciones de gas natural las que proveen de la mayoría de energía de autoconsumo, excepto en Suecia y Austria.

Si bien estos datos son un buen indicador acerca del desarrollo del autoconsumo en España, el PNIEC (MITERD, 2024) marca como objetivo 19 GW instalados de autoconsumo antes de 2030, los cuales cubrirían alrededor del 11 % de la demanda. Para llegar a este objetivo, es necesario instalar unos 13 GW adicionales de autoconsumo.

En cuanto a iniciativas ciudadanas constituidas como Comunidades Energéticas, dado que las figuras legales están todavía a la espera de transposición en muchos de los Estados Miembros de la Unión, su clasificación es muy variada y a veces incoherente en los diferentes inventarios existentes. En algunos de los últimos trabajos científicos al respecto (Koltunov *et al.*, 2023; Wierling *et al.*, 2023), los países líderes en iniciativas operativas de CE en 2023 eran Alemania, Países Bajos, Dinamarca, Austria y Francia (Figura 10). España, con 40 iniciativas operativas, se situaba hacia la cola de la Unión, si bien son muchas más las iniciativas registradas hoy en día. El último Informe de Indicadores (2023) del Observatorio Nacional de Comunidades Energéticas dentro de la iniciativa Energía Común liderada por Ecōdes, recoge 357 iniciativas en España, de las cuales solo un 10 % están operativas, número que es coherente con la literatura científica recogida en 2023. A nivel europeo, las comunidades energéticas suman más de 12 GW instalados (European Commission, 2024), si bien las comunidades energéticas españolas podrían sumar otros 9 GW (IDAE, 2025) de generación eléctrica.

Figura 8.**Energía de autoconsumo en hogares**

Fuente: elaboración propia
a partir de Eurostat (2024).

**Figura 9.****Energía de autoconsumo en industria**

Fuente: elaboración propia
a partir de Eurostat (2024).

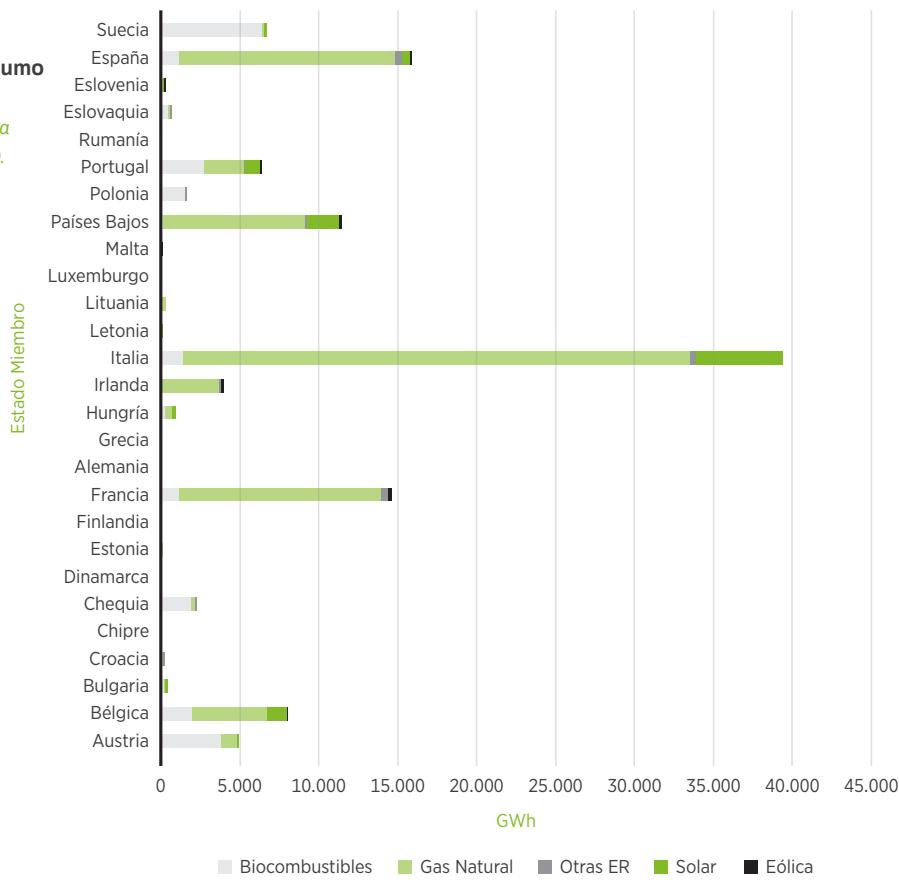
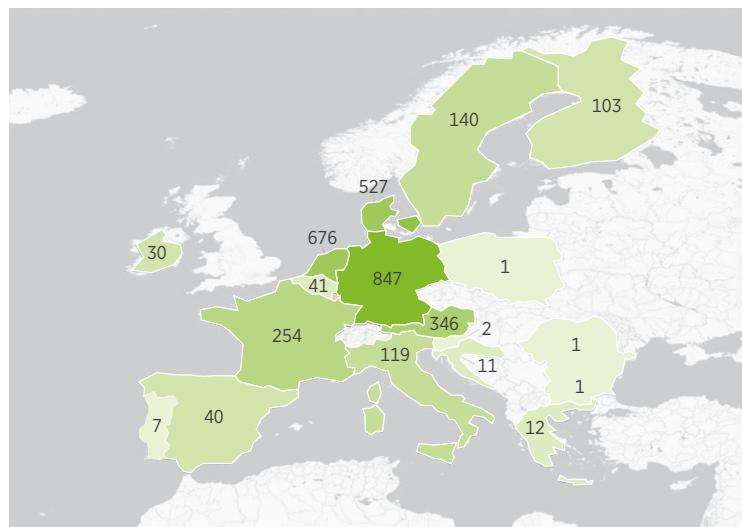


Figura 10.

Número de iniciativas relacionadas con las comunidades energéticas por país en Europa

Fuente: *Elaboración propia a partir de Koltunov et al. (2023)*.



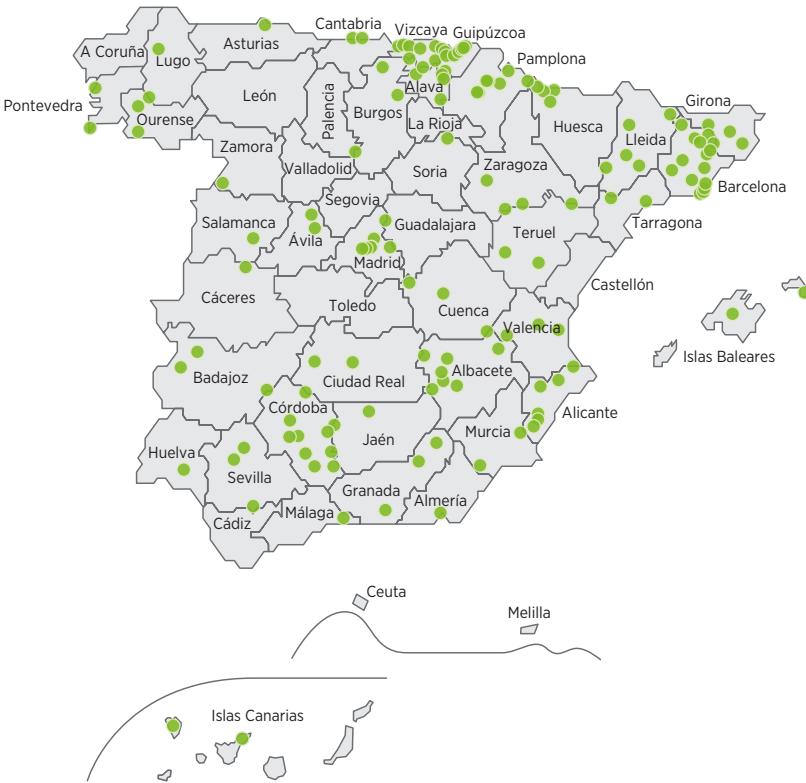
Uno de los inventarios más actualizado de comunidades energéticas es el elaborado por el IDAE, donde se han registrado todos aquellos proyectos participantes en las ayudas «CE-Implementa». Este repositorio suma hoy en día 69 comunidades energéticas repartidas por todo el territorio nacional. El número de proyectos no constituidos aún suma 337, 220 de ellos situados en municipios de Reto Demográfico. Respecto a las 69 comunidades, están compuestas en un 85,4 % por personas físicas, un 14,3 % por PYMES, y en un 0,3 % por entidades locales. En cuanto a las actividades desarrolladas, 43 de ellas cuentan con generación eléctrica renovable, y 2 de ellas con generación térmica renovable. Entre las otras actividades y servicios posibles, 9 comunidades tienen planes de eficiencia energética, 9 de movilidad sostenible, y 11 de gestión de la demanda.

Entre los proyectos registrados por el Observatorio Nacional de Comunidades Energéticas, la mayoría de los proyectos (más de la mitad) también se centran en el autoconsumo fotovoltaico colectivo, seguido de la formación y asesoramiento energéticos, la movilidad eléctrica, el almacenamiento, y la rehabilitación energética (mejora de la eficiencia).

Sobre el reparto territorial de las comunidades energéticas, tanto las 69 registradas en el IDAE (Figura 11) como el total de proyectos a nivel nacional recogidos por el Observatorio, se concentran sobre todo en Cataluña y en el País Vasco. No es de extrañar ya que ambas Comunidades Autónomas se encuentran entre aquellas que han desarrollado una regulación específica en materia de negocios colaborativos con los consumidores (autoconsumo y comunidades energéticas principalmente). Las Comunidades Autónomas con regulación específica son: Andalucía, Aragón, Cataluña, Comunidad Foral de Navarra, País Vasco, y Comunidad Valenciana.

- En Andalucía, la Ley 8/2018 promueve el autoconsumo y la participación local en la producción y distribución de energía renovable. El Plan Andaluz de Acción por el Clima fomenta la generación distribuida y el autoconsumo, incluyendo el apoyo a

Figura 11.
Distribución territorial de las comunidades energéticas
Fuente: IDAE.



comunidades energéticas locales. La Estrategia Energética de Andalucía 2030 incluye programas específicos para el desarrollo de comunidades energéticas, especialmente entre colectivos vulnerables.

- En Aragón, la Ley 1/2021 simplifica la tramitación de instalaciones de autoconsumo. La Estrategia Aragonesa de Cambio Climático promueve el autoconsumo en sectores doméstico y de servicios. Aunque el Decreto-Ley 1/2023, que incluía medidas para el autoconsumo y la creación de mancomunidades de energía, fue anulado, su contenido reflejaba un esfuerzo por impulsar estas prácticas.
- En Cataluña, la Ley 16/2017 y el Decreto-Ley 16/2019 facilitan el autoconsumo y la participación local en proyectos de energía renovable. El Decreto-Ley 24/2021 simplifica la tramitación administrativa para instalaciones de autoconsumo y fomenta la aceptación social de proyectos renovables.
- En Navarra, la Ley Foral 4/2022 regula el autoconsumo y declara las comunidades energéticas como inversiones de interés foral. La Oficina de Transformación Comunitaria de Navarra (OTC) ofrece apoyo técnico, jurídico y económico para la creación de comunidades energéticas.
- En el País Vasco, la Ley 4/2019 y el Decreto 254/2020 promueven la sostenibilidad energética y la transición hacia energías renovables. La Ley 1/2024 establece un marco jurídico para la transición energética, incluyendo el fomento del autoconsumo y las

comunidades energéticas. Además, se ha implementado un canon de energías renovables que grava las instalaciones en suelo no urbanizable, con exenciones para el autoconsumo.

- Por último, en la Comunidad Valenciana, la Ley 6/2022 fomenta el autoconsumo y la participación local en proyectos de energía renovable. El Decreto-Ley 7/2024 simplifica la tramitación de instalaciones de autoconsumo en suelo no urbanizable. El Registro Administrativo de Autoconsumo facilita la gestión de instalaciones de autoconsumo, promoviendo las comunidades energéticas.

Si bien en el PNIEC no se establecen objetivos concretos en número de comunidades energéticas a desarrollar antes de 2030, el texto sí propone instrumentos y medidas que faciliten y refuerzen el rol de las comunidades energéticas en la transición y en garantizar el derecho al acceso a la energía. Son explícitamente mencionadas como prioridad en el objetivo de reducción del 55 % de emisiones respecto a 2005 dentro del sector residencial, comercial y servicios. También en el objetivo del 43 % de mejora de eficiencia energética en residencial, urbano y ciudadano.

Entre las medidas contempladas en el PNIEC, las comunidades energéticas se consideran parte de múltiples medidas, entre otras: Medida 1.3 (Desarrollo de nuevas instalaciones de generación eléctrica con renovables), Medida 1.6 (Gestión de la demanda y la flexibilidad), Medida 1.8 (Desarrollo del autoconsumo con renovables y la generación distribuida, anteriormente mencionado), Medida 1.12 (Proyectos singulares y estrategia para la energía sostenible en las islas), Medida 1.24 (Ciudadanía en el centro) y de forma específica en la Medida 1.23 (Comunidades Energéticas).

En esta Medida 1.23 centradas en las CE, se establece como mecanismos de actuación varias acciones:

- La reforma C7.R3 del PRTR (Desarrollo de las comunidades energéticas), la cual cuenta con un presupuesto de 100 millones de euros, destinados a activar procesos participativos, informativos y divulgativos, así como la constitución legal de estas figuras. También puede incluir proyectos de demostración para validar modelos posibles.
- La constitución de una red de oficinas en todo el territorio nacional que permita promover el concepto de CE mediante difusión, formación, acompañamiento, consultoría, etc.
- Establecimiento de una red de experiencia coordinada por el IDAE e integrada en la anteriormente mencionada red de oficinas.
- La promoción de proyectos de demostración que cubran un espectro lo más amplio posible de casuísticas.
- La promoción e implementación de microrredes industriales y comunidades energéticas industriales para promoverlas no solo en el ámbito residencial.

4. Conclusiones y recomendaciones

La legislación sobre autoconsumo del RD 244/2019 ha constituido un desarrollo regulatorio clave para el despliegue de las instalaciones de autoconsumo tanto individual como colectivo. Los altos precios de la energía observados en 2022 y 2023 fruto de la crisis energética asociada con la salida de la covid-19 y la guerra de Ucrania ha promovido un despliegue de esta tecnología como forma de apantallarse frente a la volatilidad de precios y reducir la factura. España debido a sus condiciones climáticas y al favorable desarrollo regulatorio es uno de los países líderes en Europa en instalaciones de autoconsumo.

Los objetivos ambiciosos que marca el PNIEC para el autoconsumo de pasar de los actuales 6-7 GW a 19 GW en 2030, plantea dudas razonables sobre si las condiciones de rentabilidad necesarias se darán para posibilitar este desarrollo. El principal obstáculo se presenta debido al efecto de canibalización de precios observado en el mercado debido a la progresiva penetración de generación solar, tanto en tecnología de centrales de gran tamaño como en instalaciones de autoconsumo.

La alternativa que se presenta como solución a este problema es incrementar la instalación de recursos de almacenamiento como parte de las instalaciones de autoconsumo, tanto individual como colectivo, para aumentar la ratio y el valor de la energía autoconsumida y además favorecer la participación de estas instalaciones en los diferentes mercados de energía y balance. Todo ello se verá favorecido por la tendencia decreciente de los costes de inversión del almacenamiento, especialmente de las baterías.

Las comunidades energéticas por el contrario adolecen todavía del marco regulatorio necesario para su desarrollo. Las iniciativas hasta ahora en operación son testimoniales de lo que puede llegar a ser un futuro donde las ventajas de los RED y de compartir energía de forma sistemática y sencilla, puede poner de relieve la efectividad de la flexibilidad de la demanda y de la producción renovable descentralizada, tan necesarias en la transición energética.

Quedan muchos aspectos clave por resolver, por ejemplo, el papel de las empresas comercializadoras en la promoción y facilitación de estas iniciativas. Los modelos de gobernanza efectivos, las sinergias y complementariedades con los modelos de autoconsumo colectivo ya operativos, por poner algunos ejemplos.

Todos estos desarrollos son clave para hacer una realidad la visión futurista sobre la transición que ya se materializó en el paquete de energía limpia para todos los ciudadanos que se plasmó en la Directiva Europea 2019/944. Ambos instrumentos, el autoconsumo y las comunidades energéticas, son la base para conseguir un sistema renovable, libre de emisiones, con recursos flexibles desde la demanda, y poniendo a los consumidores en el centro de la transición.

Referencias bibliográficas

- CNMC (2024): *La Mesa de Diálogo del Autoconsumo define medidas para acelerar su despliegue en España / CNMC.* Disponible en: <https://www.cnmc.es/prensa/inf-conclusiones-mesa-autoconsumo-20240715>
- Consejo de la Unión Europea (2024a): *Consejo de Transporte, Telecomunicaciones y Energía (Energía); Consilium.* Disponible en: <https://www.consilium.europa.eu/es/meetings/tte/2024/05/30/>
- Consejo de la Unión Europea (2024b): *Objetivo 55—El plan de la UE para la transición ecológica;* Consilium. Disponible en: <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/fit-for-55/>
- Consejo de la Unión Europea (2024c): *Pacto Verde Europeo;* Consilium. Disponible en: <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/green-deal/>
- European Comission (2022): *Communication from the commission to the european parliament, the european council, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions REPowerEU Plan.* Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%202022%20%20%AFIN&qid=1653033742483>
- European Commission (2024): *Energy Communities Repository products.* Disponible en: https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/energy-consumers-and-prosumers/energy-communities/energy-communities-repository-products_en
- Eurostat (2024): *Electricity production and self-consumption by sector and fuel.* Disponible en: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_ind_epsc/default/table?lang=en&category=nrg.nrg_quant.nrg_quanta.nrg_ind
- Fraunhofer; Kost, Christoph (2021): *Study: Levelized Cost of Electricity - Renewable Energy Technologies;* Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE). Disponible en: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/cost-of-electricity.html>
- IDEA (2025): *Visor de Comunidades Energéticas.* Disponible en: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiZGExZmE3Y2UtMmRiMy00YjM1LTImODgtYzRjMTI5ZWRjYjE5IiwidCI6ImQ3YmJmMmMyLWY2NzktNDdkOS05MzdjLTk2ZTdiNDgzNzcyZCIsImMiOjI9>
- IRENA (2024): *Renewable Power Generation Costs in 2023.* Disponible en: <https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023>
- Koltunov, M.; Pezzutto, S.; Bisello, A.; Lettner, G.; Hiesl, A.; van Sark, W.; Louwen, A. & Wilczynski, E. (2023): *Mapping of Energy Communities in Europe: Status Quo and Review of Existing Classifications.* *Sustainability*, 15(10); Article 10. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/su15108201>
- Ministerio de la Presidencia, Justicia y Relaciones con las Cortes (2013): *BOE-A-2013-13645 Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico.* Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2013-13645>

MITERD (2024): *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC 2023-2030)*; Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/energia/estrategia-normativa/pniec-23-30.html>

Orden TED/1446/2021, de 22 de diciembre, por la que se aprueban las bases reguladoras para la concesión de ayudas del programa de incentivos a proyectos piloto singulares de comunidades energéticas (Programa CE Implementa), en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, Pub. L. No. Orden TED/1446/2021, BOE-A-2021-21343 162316 (2021). Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/o/2021/12/22/ted1446>

Parlamento y Consejo Europeos (2024): *Regulation—EU - 2024/1610—EN - EUR-Lex*. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1610/oj/eng>

Red Eléctrica (2024): *Potencia instalada / Informes del sistema*. Disponible en: <https://www.sistemaelectrico-ree.es/informe-del-sistema-electrico/generacion/potencia-instalada>

Wierling, A.; Schwanitz, V. J.; Zeiss, J. P.; von Beck, C.; Paudler, H. A.; Koren, I. K.; Kraudzun, T.; Marcroft, T.; Müller, L.; Andreadakis, Z.; Cadelise, C.; Dufner, S.; Getabech, M.; Glase, G.; Hubert, W.; Lupi, V.; Majidi, S.; Mohammadi, S.; Nosar, N. S.; Zoubin, N. (2023): A Europe-wide inventory of citizen-led energy action with data from 29 countries and over 10000 initiatives. *Scientific Data*, 10(1), 9. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01902-5>