

PANORAMA DE LA INNOVACIÓN PARA UN FUTURO IMPULSADO POR LAS ENERGÍAS RENOVABLES: SOLUCIONES PARA INTEGRAR LAS ENERGÍAS RENOVABLES VARIABLES



Copyright © IRENA 2019

A menos que se indique lo contrario, el material que contiene esta publicación puede ser utilizado, compartido, copiado, reproducido, impreso o almacenado libremente, siempre que se reconozca debidamente a IRENA como fuente y titular de los derechos de autor. El material de la presente publicación que se atribuye a terceros puede estar sujeto a otras condiciones de uso y limitaciones, y es posible que sea necesario obtener la correspondiente autorización de dichos terceros antes de hacer cualquier uso de ese material.

Cita: IRENA (2019), *Panorama de la innovación para un futuro impulsado por las energías renovables: soluciones para integrar las energías renovables variables. Resumen para responsables políticos*. Agencia Internacional de Energías Renovables, Abu Dhabi.

Exención de responsabilidad

Esta publicación y el material que figura en ella se presentan en el estado en que se encuentran. IRENA ha tomado todas las precauciones razonables para verificar la fiabilidad del material presentado en esta publicación. Sin embargo, ni IRENA ni sus funcionarios, agentes, y proveedores externos de datos o contenidos ofrecen garantía alguna, ni expresa ni implícita, y no asumen responsabilidad alguna por las consecuencias que pueda tener el uso de la presente publicación o del material que figura en ella. La información contenida en la presente publicación no representa necesariamente los puntos de vista de los Miembros de IRENA. La mención de empresas específicas o ciertos proyectos o productos no significa que IRENA los respalde o recomiende por encima de otros de naturaleza similar que no aparezcan mencionados. Las designaciones empleadas y la presentación del material de la presente publicación no significan la expresión de ninguna opinión por parte de IRENA sobre la situación jurídica de ninguna región, país, territorio o ciudad o zona ni de sus autoridades, ni en relación con la delimitación de sus fronteras o límites.

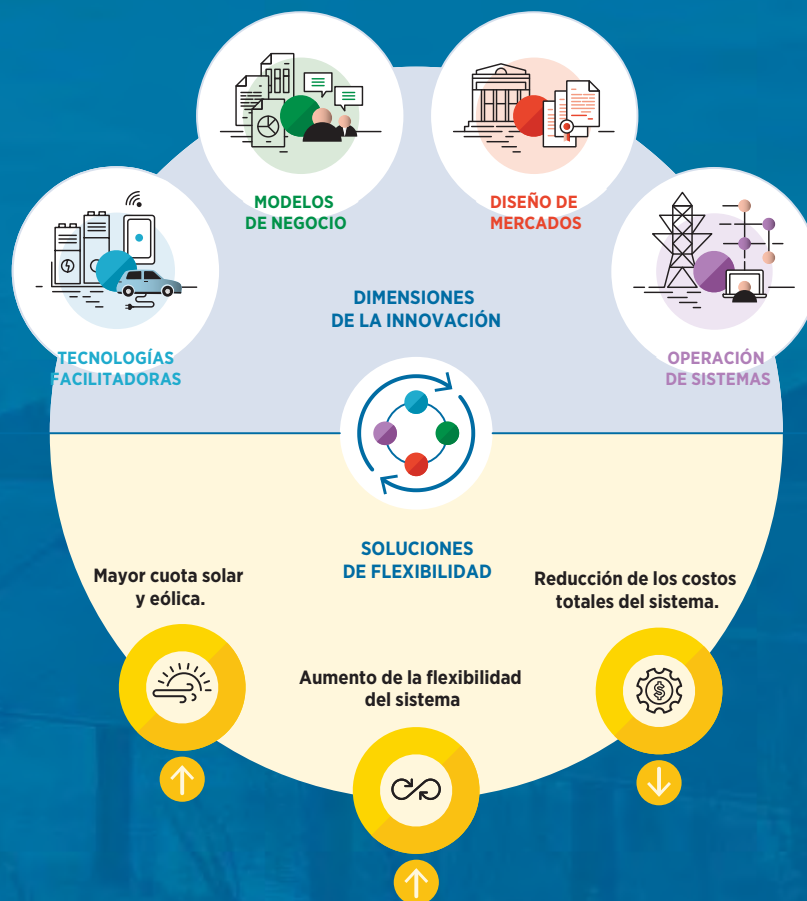
Las fotografías son de Shutterstock.



ACERCA DE ESTE RESUMEN

La publicación de IRENA “Panorama de la innovación para un futuro impulsado por las energías renovables: soluciones para integrar las energías renovables variables” reúne información clave sobre innovaciones que facilitan una mayor participación de las energías renovables variables (ERV) en el sector energético. En la práctica, las soluciones para la integración de ERV se derivan de las sinergias entre diferentes innovaciones a través de diferentes dimensiones. El informe analiza las innovaciones más importantes y crea vínculos entre ellas, a fin de obtener soluciones prácticas para la integración de ERV en diferentes entornos.

Este resumen para responsables políticos expone las conclusiones del informe, que se centra en la flexibilidad del sistema energético como principal facilitador de la integración de las energías renovables. En este resumen se describen las treinta innovaciones en tecnologías facilitadoras, diseño de mercados, modelos de negocio y operación del sistema, identificadas en el estudio, que están transformando los sectores energéticos fundamentados en las ERV. Este documento también presenta las soluciones para la integración de las ERV, seguidas de un análisis de costo-beneficio. Las principales recomendaciones para los responsables políticos se resumen en un plan de innovación de ocho pasos para lograr un futuro impulsado por las energías renovables.



La transformación del sector eléctrico requiere innovación a lo largo de todo el sector.



La innovación es el motor que impulsa la transformación energética global. Además, se está acelerando en todo el mundo el ritmo de desarrollo y mejor introducción de tecnologías de energía renovable más eficientes. Las energías renovables se están convirtiendo en la opción a elegir para muchos países en su transición hacia un suministro de energía seguro, rentable y ambientalmente sostenible. Sustentan un desarrollo socioeconómico continuo creando empleo y valor local, al mismo tiempo que combaten el cambio climático y la contaminación atmosférica local.

Hasta la fecha, el sector energético ha marcado el camino, con rápidas reducciones del costo de las tecnologías solar y eólica, lo que ha favorecido su extensa adopción en muchos países. Sin embargo, pese a los prometedores progresos realizados, la transición energética necesita acelerar significativamente el paso. Al igual que ocurre con las políticas de mercado, las políticas de innovación tecnológica deben revisarse y actualizarse continuamente para mantenerse al día con

los nuevos desarrollos y avances (IRENA, IEA y REN21, 2018).

La integración de las ERV plantea desafíos específicos a medida que aumenta su participación en la generación de energía; en esencia, mantener el equilibrio de la oferta y la demanda se convierte en un desafío mayor. Se necesitan sistemas energéticos más flexibles e integrados para maximizar el valor de las ERV de bajo costo, es decir, las energías solar y eólica.

Con este fin, los responsables políticos y los operadores de sistemas de todo el mundo están adoptando una serie de medidas para mantener un equilibrio asequible y confiable de la oferta y la demanda en este cambiante panorama. La innovación se centra en fomentar el desarrollo y la implementación de soluciones que aumenten la flexibilidad que necesita el sistema para integrar cuotas elevadas de energía solar y eólica.

En los últimos años, gobiernos con visión hacia el futuro y empresas pioneras de todo el mundo han

Flexibilidad: La capacidad de un sistema eléctrico para hacer frente a la variabilidad e incertidumbre que la energía solar y eólica introducen en diferentes intervalos de tiempo, desde el muy corto plazo hasta el largo plazo, evitando el vertido de energía de estas fuentes de energías renovables variables (ERV) y suministrando de forma fiable toda la energía demandada a los clientes (IRENA, 2018a).

Variabilidad: La naturaleza fluctuante de los recursos solares y eólicos, que se traduce en cambios posiblemente rápidos en la generación de electricidad.

Incertidumbre: La incapacidad de predecir perfectamente la producción futura de energía solar y eólica.



estado trabajando en la creación, demostración e implementación de una multitud de soluciones innovadoras con potencial para transformar radicalmente los sistemas energéticos alrededor del mundo. La gran diversidad de soluciones, junto con las diferencias entre los sistemas energéticos locales, puede generar cierta confusión en los responsables de las decisiones, que quizás tengan dificultades para determinar y evaluar las mejores soluciones para cada país o contexto.

La Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) ha llevado a cabo un análisis extenso y detallado del panorama de la innovación para la integración de las energías renovables variables, que incluye la cartografía y clasificación de los numerosos ejemplos de innovación y soluciones innovadoras. El informe que se ha elaborado,

combinado con distintos recursos en línea, tiene como objetivo brindar a los responsables de las decisiones una guía clara y sencilla sobre la diversidad de innovaciones actualmente en desarrollo —o en algunos casos ya en uso— en diferentes entornos en todo el mundo. Estas innovaciones se combinan en una gran variedad de sistemas energéticos por todo el planeta. El marco de trabajo así creado debería facilitar la toma de decisiones con conocimiento de causa sobre las posibles soluciones para cada caso particular.

Este resumen se estructura de la siguiente manera:

- I La transformación del sector eléctrico requiere la integración de las energías renovables variables.
- II Las tendencias de electrificación, descentralización y digitalización están cambiando el paradigma del sector energético.
- III El panorama de la innovación para la integración de ERV abarca tecnologías facilitadoras, el diseño de mercados, modelos de negocio y operación del sistema.
- IV Las innovaciones pueden potenciar la flexibilidad a través del sistema energético.
- V Las soluciones a la medida se confeccionan usando las innovaciones como bloques de construcción.
- VI Evaluación del impacto de la implementación de soluciones de flexibilidad.
- VII Innovaciones para reducir los costos del sistema y maximizar los beneficios.
- VIII Plan de innovación de ocho pasos para la transformación del sector eléctrico.

I. LA TRANSFORMACIÓN DEL SECTOR ELÉCTRICO REQUIERE LA INTEGRACIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES VARIABLES

El mundo está experimentando una transformación hacia un futuro energético más inclusivo, seguro, rentable, sostenible y con bajas emisiones de carbono. Uno de los componentes críticos es la energía renovable. Esta transformación está promovida por una preocupación pública sin precedentes, seguida de una acción política para abordar los problemas del desarrollo sostenible y el cambio climático en todo el mundo, tal como se refleja en los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas y el Acuerdo de París sobre el cambio climático.

El sector eléctrico lidera la transición energética en curso, impulsada por las políticas ambientales y de salud y el rápido descenso de los costos de la electricidad renovable, en particular de la generación eólica y solar fotovoltaica. El costo de la electricidad generada a partir de la energía solar fotovoltaica se redujo en un 77 % entre 2010 y 2018, y el costo de la electricidad eólica terrestre se redujo en un 30 % en el mismo período (IRENA, 2018b).

Se estima que en 2017 las energías renovables representaron una cuarta parte de la generación eléctrica global (IRENA, 2017a), con un impresionante crecimiento en el despliegue de las tecnologías eólica y solar fotovoltaica. A finales de 2017, la capacidad instalada de energías renovables alcanzó los 2 337 gigavatios (GW), representando el 34 % de la capacidad total de generación de energía (IEA, 2018). La mayor parte era energía hidroeléctrica (54 %), seguida de energía eólica (22 %) y energía solar fotovoltaica (17 %). Cabe esperar que la proporción de energía eólica y solar fotovoltaica continúe aumentando a un ritmo acelerado en los próximos años (IRENA, 2018c). En algunos países, la penetración de la energía eólica y solar fotovoltaica ya es mucho mayor que la media mundial.

Dinamarca e Irlanda, por ejemplo, son líderes en integración de la energía eólica, con porcentajes del 44 % y 27 % respectivamente, y una penetración instantánea máxima superior al 150 % y al 60 % de la demanda respectivamente (RTE, 2018; EirGrid y SONI, 2018).

No obstante, la transición energética necesita que este crecimiento se acelere todavía más. Según el análisis de IRENA, para descarbonizar el sector energético en la línea de los objetivos climáticos establecidos en el Acuerdo de París, la participación de las energías renovables en la generación eléctrica total debería alcanzar el 85 % en 2050 (Figura S1) (IRENA, 2018c). Además, la proporción de la electricidad en la demanda total de energía de los sectores de uso final (industria, transporte y edificios) debe aumentar del 20 % en 2015 a más del 50 % en 2050.

En un escenario compatible con el Acuerdo de París, las tecnologías ERV, en particular la energía solar fotovoltaica y eólica, desempeñan un papel fundamental en la transición energética. La capacidad de ERV sigue liderando, desde los 900 GW de hoy hasta los 13 000 GW que se alcanzarán en 2050, momento en que representará el 60 % de la generación eléctrica total. Para ello será necesario triplicar los incrementos anuales de capacidad eólica y duplicar los incrementos de la capacidad de energía solar fotovoltaica con respecto a los niveles de 2017.

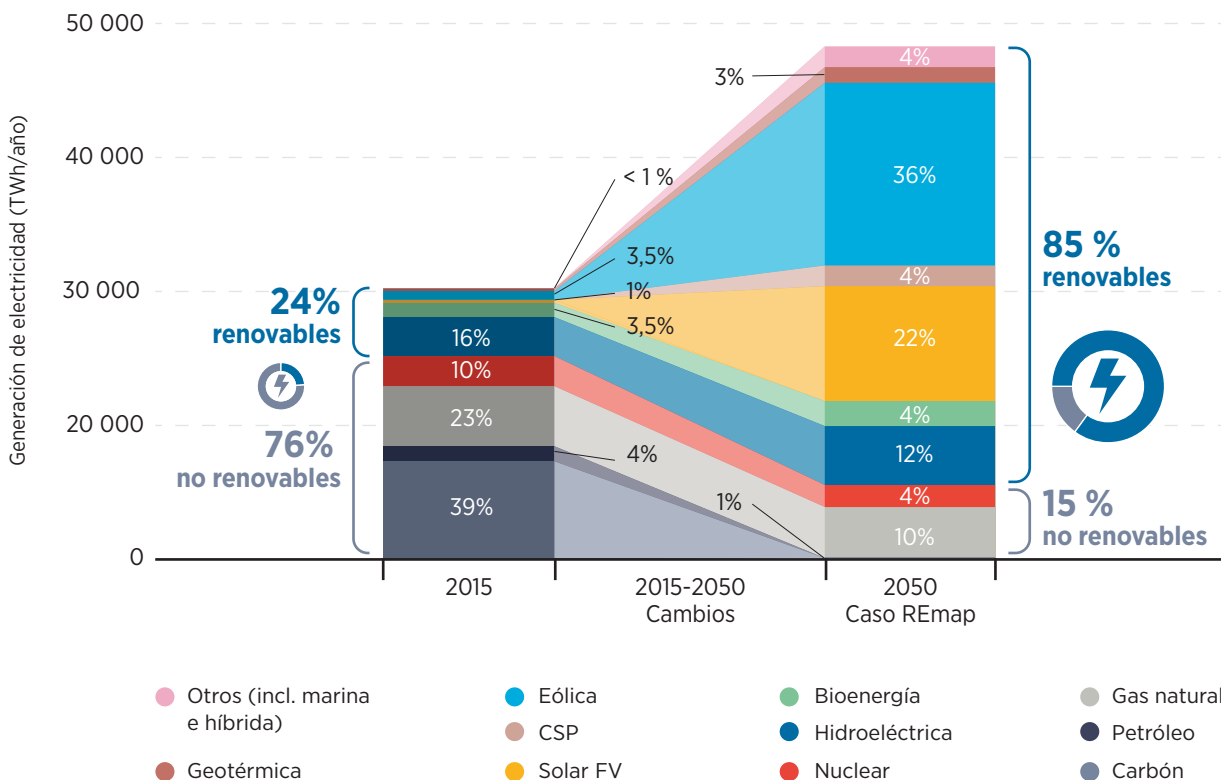
La innovación es crucial para estimular la integración de las ERV e impulsar la transformación energética global



Por lo tanto, la **innovación para la integración de una elevada proporción de ERV en los sistemas eléctricos es crucial para el éxito de la transformación energética global**³. La integración de una proporción tan alta de ERV tiene implicaciones importantes: es preciso flexibilizar los sistemas eléctricos, contener sus costos; y los diseños de sistemas deben tener en cuenta los

cambios resultantes por tendencias de innovación en curso, *por ejemplo*, la digitalización, la electrificación y la descentralización, que probablemente se producirán con o sin la integración de las ERV.

Figura S1 Desglose de la generación de electricidad por fuente en un escenario compatible con el Acuerdo de París



Nota: CSP = energía solar concentrada; TWh = teravatios.hora.

Fuente: IRENA (2018c), *Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050*, www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA_Report_GET_2018.pdf

³ El informe completo contiene información detallada sobre las innovaciones emergentes que pueden favorecer la integración de elevadas cuotas de ERV, especialmente incrementando la flexibilidad del sistema eléctrico. El trabajo se basa en el análisis de cientos de proyectos e iniciativas de innovación que se están implementando en todo el mundo y en el conjunto del sector eléctrico, en relación con las tecnologías facilitadoras, el diseño de mercados, los modelos de negocio y la operación del sistema. Estas innovaciones se han cartografiado y agrupado en categorías, y el resultado es un conjunto de 30 tipos de innovación.

II. LAS TENDENCIAS DE ELECTRIFICACIÓN, DESCENTRALIZACIÓN Y DIGITALIZACIÓN ESTÁN CAMBIANDO EL PARADIGMA DEL SECTOR ELÉCTRICO.

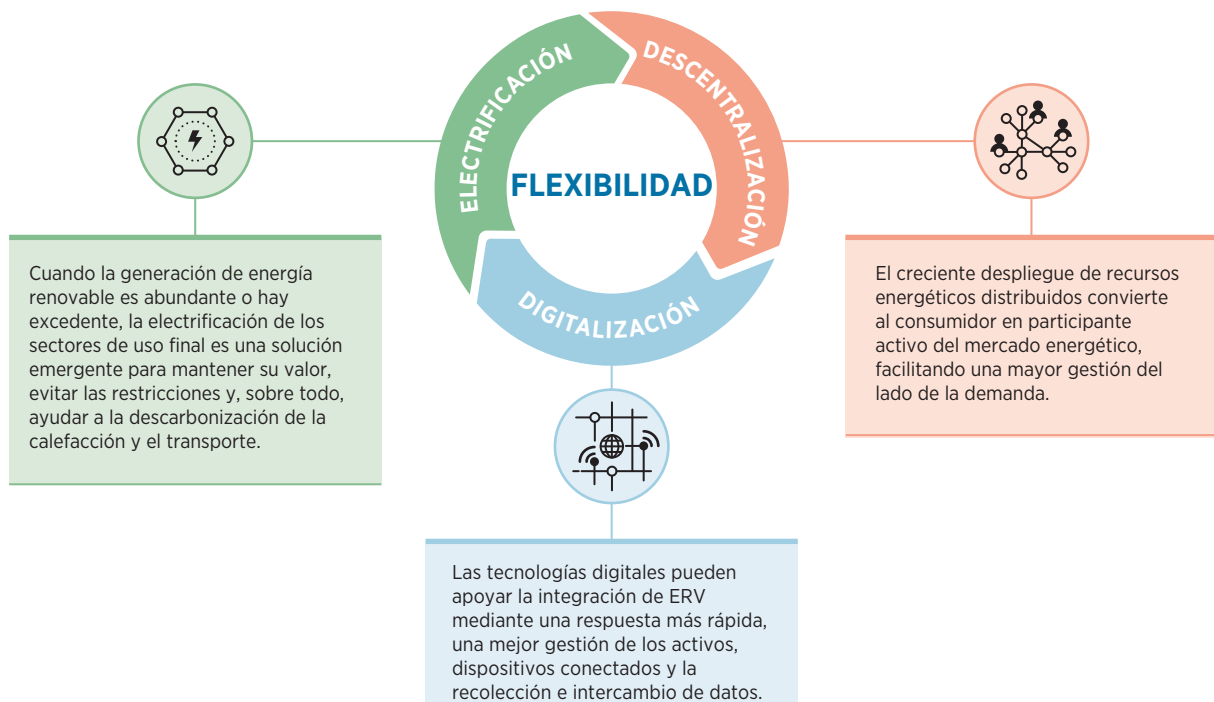
La transformación del sector energético se está acelerando debido a la combinación de la **electrificación**, la **descentralización** y la **digitalización** (Figura S2).

Estas son las principales tendencias de innovación que están cambiando los paradigmas, flexibilizando los sistemas para lograr una elevada penetración de las ERV, modificando roles y responsabilidades y abriendo las puertas a nuevos participantes en el sector.

Electrificación de los sectores de uso final

La electrificación con energía renovable es la pieza clave para la descarbonización de los sectores de uso final: transporte, edificios e industria. En consecuencia, se están conectando nuevas cargas de electricidad (por ejemplo, vehículos eléctricos [VE], bombas de calor o calderas eléctricas) a los sistemas eléctricos a gran escala, principalmente en el nivel de distribución. Si no se administran bien, estas nuevas cargas pueden crear la necesidad de aumentar la capacidad energética y forzar la red, de modo que se requieran inversiones adicionales para reforzar la infraestructura eléctrica.

Figura S2 Las tres tendencias que transforman el sector eléctrico.



Recuadro 1. Flexibilidad gracias a los VE de carga inteligente

Los vehículos eléctricos no solo están transformando el sector del transporte, sino que también están a punto de remodelar el mercado eléctrico al aportar una nueva fuente de flexibilidad. En junio de 2018 había ya cuatro millones de automóviles eléctricos en circulación, de los cuales el 40 % se encontraba en China, frente a un total de aproximadamente mil millones de automóviles en todo el mundo (BNEF, 2018). Las matriculaciones de vehículos eléctricos alcanzaron un nuevo récord en 2017, con más de un millón de ventas en todo el mundo, lo que representa alrededor del 1,3 % de las ventas totales de automóviles.

Muchos países y empresas estudian cómo integrar la infraestructura de carga necesaria para estos vehículos en los sistemas eléctricos. Por ejemplo, Nissan y Enel se asociaron para implementar una solución de administración de energía que utiliza unidades de carga del vehículo a la red (por sus siglas en inglés V2G, Vehicle to Grid), y que permite a los propietarios de automóviles que son usuarios de electricidad operar como centros de energía individuales, capaces de extraer, almacenar y devolver electricidad a la red. La empresa Nuvve ofrece soluciones de software V2G que permiten realizar liquidaciones entre los participantes del mercado. Se lanzaron proyectos piloto en Dinamarca (Proyecto Parker) y en el Reino Unido para probar esta solución. A lo largo de 2016, los propietarios de los VE de Nissan ganaron dinero enviando electricidad a la red a través de los cargadores bidireccionales de Enel, y los operadores de sistemas de transmisión (OST) daneses y británicos se beneficiaron de los servicios de red de regulación primaria (Nissan Newsroom Europe, 2016).

La electrificación del calor también va en aumento. Se cree que había más de 10 millones de bombas de calor instaladas en Europa a finales de 2017 (EPHA, 2018). Las bombas de calor crean oportunidades para aplicaciones de gestión de la demanda como el desplazamiento de cargas y la nivelación de picos. Además, las aplicaciones industriales han comenzado a usar electricidad para producir hidrógeno, calor y otras formas de energía, lo que permite absorber la generación de energía renovable intermitente y de bajo costo durante el período de máxima generación.

Por el contrario, si se hace de manera inteligente, estas nuevas cargas pueden favorecer la flexibilidad a través de estrategias de gestión de la demanda que ayuden a integrar más energías renovables en el sistema eléctrico. Muchas de estas nuevas cargas son intrínsecamente flexibles, ya que: (a) incluyen las baterías (por ejemplo, baterías de VE) o el almacenamiento térmico (por ejemplo, bombas de calor o calderas eléctricas con tanques de agua caliente), y (b) su uso puede cambiar con el tiempo, lo que ayuda a adaptar el patrón de demanda para que coincida con la disponibilidad de generación y la capacidad de la red de distribución. **Un enfoque inteligente para la electrificación es crucial** para aprovechar estas ventajas, lo que implica una utilización óptima de los equipos eléctricos y brindar a los clientes incentivos para que modifiquen sus patrones de uso de manera coherente con las necesidades del sistema eléctrico.

Descentralización de los sistemas eléctricos

El sistema energético se está descentralizando, de hecho, gracias a la aparición de los recursos energéticos distribuidos (DER, por sus siglas en inglés) conectados al punto de consumo. Esto incluye: tejados solares fotovoltaicos, las microturbinas eólicas, los sistemas de almacenamiento de energía con batería detrás del contador (BtM, por sus siglas en inglés), las bombas de calor y los VE enchufables. Actualmente, la generación de electricidad a partir de turbinas eólicas y energía solar fotovoltaica está en gran parte centralizada. Sin embargo, la generación distribuida —especialmente los tejados fotovoltaicos—, que en la actualidad representa

Recuadro 2. Mejor acceso a la energía a través de los DER y de la digitalización.

La energía renovable distribuida, en combinación con las tecnologías digitales, también está contribuyendo a resolver el problema del acceso a la energía. Recientemente, modelos como el comercio de energía y las comunidades de energía de pago por uso y peer-to-peer (P2P) han ganado popularidad en los mercados de energía desconectados de la red. Por ejemplo, los modelos de pago por uso han mejorado el acceso a la energía para 83,7 millones de personas en todo el mundo (GOGLA, 2017). M-KOPA, una de las empresas que opera con un modelo de pago por uso, suministra sistemas solares domésticos a hogares de Kenia y Uganda, utilizando sistemas de pago móviles para cobrar a los abonados. Esta empresa ha proporcionado acceso a la electricidad a más de 600 000 hogares de estos países, de modo que puedan disponer de iluminación, cargar teléfonos y utilizar aparatos domésticos como televisores y frigoríficos (Quartz Africa, 2018). SOLshare, una empresa emergente de Bangladesh, utiliza plataformas de comercio de energía solar P2P basadas en la tecnología de energía distribuida (SOLshare, 2017). Las plataformas de comercialización de electricidad venden el exceso de energía generada por los sistemas solares domésticos a los hogares vecinos, lo que reduce el costo anual del acceso a la energía al menos en un 25 %. La empresa espera operar más de 20 000 nanorredes y abastecer a más de un millón de clientes en Bangladesh para 2030 (CMNUCC, 2018).

alrededor del 1 % de la generación de electricidad total, está creciendo a un ritmo acelerado. El almacenamiento distribuido también ha ganado impulso. Un modelo de negocio de almacenamiento BtM permite a los clientes almacenar la electricidad generada por los paneles solares que tienen instalados en su tejado para usarla en el momento en que la necesiten o para venderla a la red. **La descentralización basada en los DER pueden ser una fuente importante de flexibilidad, por ejemplo, a través de medidas de respuesta a la demanda y modelos de negocio de agregadores.**

Digitalización del sector eléctrico

La aplicación de tecnologías de monitoreo y control digital en el ámbito de la generación y la transmisión de energía ha sido una tendencia importante durante varias décadas, y en los últimos tiempos ha comenzado a penetrar más profundamente en los sistemas eléctricos. La mayor utilización de contadores y sensores inteligentes, la aplicación de la Internet de las

Cosas (IdC) y el uso de grandes cantidades de datos con inteligencia artificial han creado oportunidades para proporcionar nuevos servicios al sistema. Las tecnologías digitales favorecen la transformación del sector eléctrico de varias maneras, por ejemplo, mejorando el monitoreo de los activos y su rendimiento, con operaciones más refinadas y un control más cercano al tiempo real, con la implementación de nuevos diseños de mercado, y con la aparición de nuevos modelos de negocio.

La digitalización es un amplificador clave de la transformación energética, ya que permite gestionar grandes cantidades de datos y optimizar sistemas con muchas pequeñas unidades de generación. Gracias a las mejoras en la comunicación, el control y, en el futuro, los contratos inteligentes automatizados basados en la tecnología de blockchain, los recursos de energía distribuidos podrán ser agrupados por los "agregadores"

Recuadro 3. La tecnología digital facilita la participación de los hogares en el mercado.

Según algunas estimaciones, hay más de 700 millones de contadores inteligentes instalados en todo el mundo, y unos 400 millones están en China. Además, para 2025, se calcula que habrá 75 000 millones de aparatos eléctricos conectados a la IdC en todo el mundo, que proporcionarán gran cantidad de información a consumidores, fabricantes y proveedores de servicios públicos (Statista, 2018).

Existe una gran variedad de empresas que estudian cómo beneficiarse del uso de tales dispositivos en aplicaciones energéticas. Por ejemplo, Envision Energy, una empresa china de energía inteligente, está invirtiendo en la investigación de una tecnología avanzada de pronóstico de la generación de energía renovable en colaboración con el Centro Europeo de Pronósticos Meteorológicos a Plazo Medio (CEPMMP), Met Office (el servicio nacional de meteorología del Reino Unido) y la Universidad de Aarhus. (BTECH CET). La investigación se centra en el uso de datos, modelos, algoritmos y tecnologías de supercomputación de última generación para mejorar los pronósticos de generación de energía renovable. Los modelos de pronósticos avanzados aumentarán la precisión de las evaluaciones de los recursos energéticos y mejorarán la capacidad de la red para planificar los insumos de energía renovable, a fin de obtener un menor costo nivelado de la energía eólica y solar⁴.

Elia, el operador del sistema de transmisión de electricidad belga, permite que la capacidad de DER preste servicios de compensación de la red. A través de una plataforma de TI compartida, todos los consumidores y generadores conectados a la red de distribución/transporte pueden prestar servicios de flexibilidad a los OST diariamente (Elia, 2018). Además, en abril de 2018, Elia lanzó un proyecto piloto de *blockchain* que explora las oportunidades que ofrece esta tecnología como sistema de pago para resolver el aspecto comercial de transacciones complejas y rápidas.

En 2018, el fabricante de baterías alemán Sonnen recibió la certificación oficial del OST Tennet para prestar servicios de red y participar en el mercado de compensación eléctrica de Alemania⁵. Los servicios de red se prestan mediante la agregación de los sistemas domésticos de almacenamiento de 30 000 hogares conectados en red. En conjunto constituyen una de las baterías virtuales más grandes del mundo en la actualidad, con una capacidad de 300 megavatios-hora (MWh). Los hogares solares interconectados pueden asumir todos los servicios de red que prestan las centrales eléctricas de carbón convencionales, y se estima que sustituyen a una central eléctrica de carbón media con una capacidad instalada de 800 megavatios (MW).

4 www.envision-energy.com/2017/12/11/envision-energy-announces-new-strategic-renewable-energy-forecasting-partnership/.

5 www.montelnews.com/en/story/sonnen-balances-german-power-with-home-batteries--report/959924.

Además de ofrecer toda una serie de servicios energéticos útiles, la generación distribuida y las tecnologías facilitadoras se han convertido en fuentes de datos de gran valor. La disponibilidad de información detallada y en tiempo real sobre los patrones de consumo, los perfiles de carga, el rendimiento de los componentes de los sistemas eléctricos y las averías puede facilitar una mejor planificación y operación del sistema por parte de los operadores de la red. También es posible mejorar los pronósticos de producción y consumo de electricidad por fuentes distribuidas teniendo como base los patrones de comportamiento del pasado. Estos desarrollos resultan en una mejor administración de los activos y operaciones, lo que aumenta la flexibilidad general del sistema.

La creciente relevancia de la digitalización también se debe a los avances en descentralización y electrificación. La descentralización produce un gran número de nuevos generadores pequeños, principalmente tejados fotovoltaicos. La electrificación del transporte y el calor implica la creación de grandes cantidades de nuevas cargas, como vehículos eléctricos, bombas de calor y calderas eléctricas. Todos esos activos nuevos en el lado de la generación (debido a la descentralización) y la demanda (debido a la electrificación) generan un impacto en los sistemas eléctricos, por lo que su monitoreo, administración y control son cruciales para el éxito de la transformación energética.

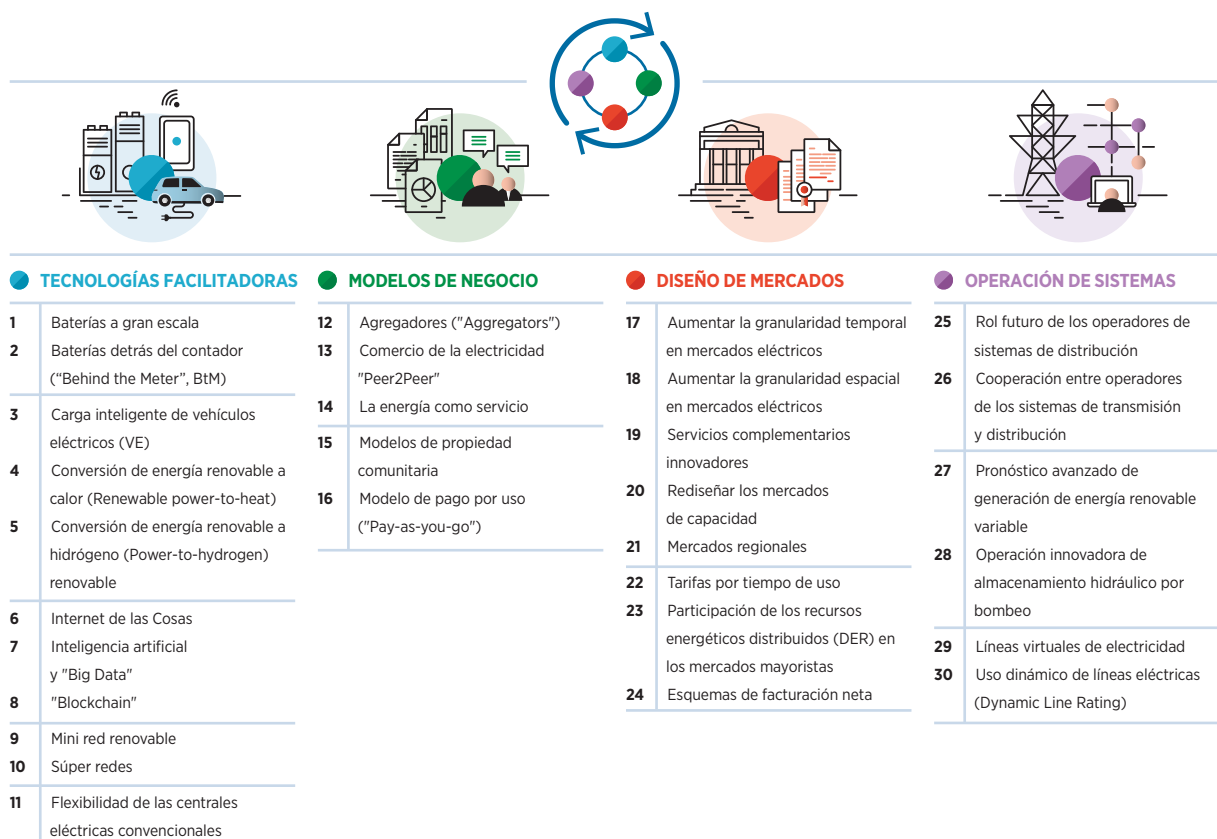


III. EL PANORAMA DE LA INNOVACIÓN PARA LA INTEGRACIÓN DE ERV ABARCA TECNOLOGÍAS FACILITADORAS, EL DISEÑO DE MERCADOS, MODELOS DE NEGOCIO Y OPERACIÓN DEL SISTEMA.

No hay déficit de innovación para abordar la integración de las ERV en los sistemas eléctricos. IRENA ha investigado el panorama de innovaciones que pueden facilitar la integración de elevadas cuotas de ERV y ha identificado **30 tipos de innovaciones transformadoras en cuatro dimensiones: tecnologías facilitadoras, modelos de negocio, diseño de mercados y operación del sistema**, según se muestra en la Figura S3.

La transformación de la energía requiere innovaciones en tecnologías facilitadoras, modelos de negocio, diseño de mercados y operación del sistema

Figura S3 El panorama de innovación para la transformación del sector eléctrico.



Estas innovaciones y los proyectos relacionados se tratan con detalle en una serie de informes de innovación asociados al presente estudio.

- **Tecnologías facilitadoras.** Las tecnologías que permiten mayor flexibilidad en los sistemas eléctricos desempeñan un papel clave para facilitar la integración de las energías renovables. Las tecnologías de generación convencionales ya existentes, como las centrales eléctricas de carbón, se están modernizando para ser más flexibles. El almacenamiento en baterías, la gestión de la demanda y las tecnologías digitales están cambiando el sector eléctrico, abriendo puertas a nuevas aplicaciones que permiten flexibilizar el sistema. La electrificación de los sectores de uso final aparece como un nuevo mercado para las energías renovables, pero también podría ser otra forma de flexibilizar la demanda, si se hace de manera inteligente.
- **Modelos de negocio.** Los modelos de negocio innovadores son clave para monetizar el nuevo valor creado por estas tecnologías y facilitar así su adopción. En el punto de consumo están surgiendo numerosos modelos de negocio innovadores a raíz del despliegue de los DER, así como sistemas

innovadores que permiten suministrar electricidad renovable en lugares donde las opciones son limitadas, como zonas sin conexión a la red o con una gran densidad de población.

- **Diseño de mercados.** Es crucial adaptar el diseño del mercado al cambio de paradigma (implantar sistemas eléctricos con bajas emisiones de carbono y elevadas cuotas de ERV) para facilitar la creación de valor y flujos de ingresos adecuados, como se detalla en el análisis anterior de IRENA (IRENA, 2017b). Se necesita innovación en los mercados mayoristas y minoristas para aprovechar al máximo el potencial de flexibilidad del sistema eléctrico.
- **Operación del sistema.** Además de las nuevas tecnologías y de un mercado bien diseñado, se necesitan innovaciones en la operación del sistema, innovaciones que están surgiendo en respuesta a la integración de mayores cuotas de ERV en la red. Se trata de innovaciones que tienen en cuenta la incertidumbre y una gestión innovadora del sistema para integrar los DER.

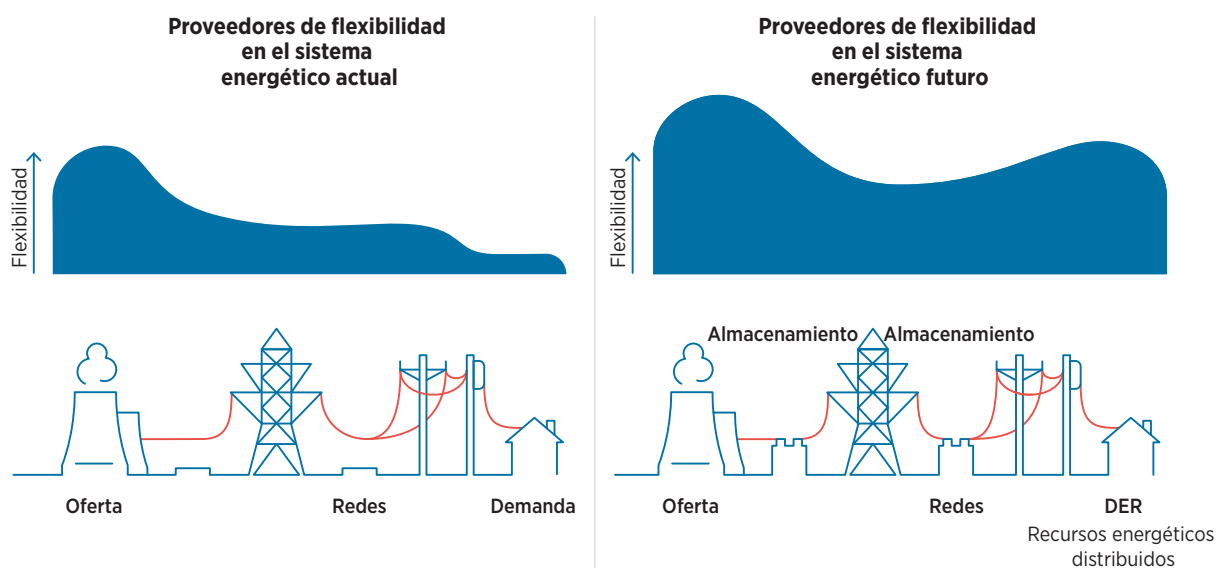


IV. LAS INNOVACIONES PUEDEN POTENCIAR LA FLEXIBILIDAD EN TODO EL SISTEMA ELÉCTRICO.

Tradicionalmente, en los sistemas eléctricos convencionales, la flexibilidad se obtenía sobre todo de la oferta, adaptando la capacidad de generación disponible a la demanda y, si era posible, utilizando el almacenamiento hidráulico por bombeo para manejar la carga de base inflexible y reducir la necesidad de centrales eléctricas para cubrir la demanda máxima. En las últimas décadas se han logrado importantes avances para aumentar la flexibilidad de las centrales eléctricas convencionales. La demanda apenas ofrecía flexibilidad, ya que en gran medida carecía de capacidad de respuesta. **Las innovaciones emergentes no solo**

incrementan la flexibilidad de la oferta, sino que también la están extendiendo a todos los segmentos de los sistemas eléctricos, incluidas las redes y la demanda. Ofrecen una cartera más amplia de soluciones que se pueden combinar y optimizar para reducir costos y maximizar los beneficios del sistema. La Figura S4 ilustra la transición de un sistema en el que la flexibilidad provenía principalmente de la generación a otro en el que todo el sistema puede ser flexible.

Figura S4 Nuevas opciones de flexibilidad en el sector eléctrico desbloqueadas por la innovación



A continuación, se indican algunas oportunidades para aumentar la flexibilidad del sistema eléctrico.

- *Flexibilidad de la oferta:* Se necesitan mayores incentivos para aumentar la flexibilidad de la oferta. Es posible flexibilizar el comportamiento de las plantas convencionales ya existentes reduciendo las cargas mínimas de explotación y los tiempos de arranque y mejorando las tasas de incremento lineal.
- *Flexibilidad de la red:* Puede incrementarse con una mayor capacidad de red e interconexiones en los mercados regionales, que permitan que la electricidad se transporte más fácilmente en una zona de regulación mayor, que abarque varias áreas de control o incluso todo el continente. La capacidad y la gestión de la red de distribución también son importantes para integrar más energía renovable de fuentes conectadas a nivel de distribución.
- *Flexibilidad de la demanda:* En lo que respecta a la demanda, la aparición de los DER, junto con un diseño del mercado que permita su participación

en el mismo, puede aumentar considerablemente la flexibilidad del sistema. Al convertirse en participantes activos de la red eléctrica, los DER responden a las condiciones del sistema y prestan servicios a la red.

- *Flexibilidad de almacenamiento a escala del sistema completo:* Las tecnologías de almacenamiento de energía son esenciales para proporcionar flexibilidad y pueden conectarse por todo el sistema eléctrico. Las baterías a gran escala y las aplicaciones de conversión de energía renovable a otras formas de energía, denominadas aplicaciones “Power-to-X” (por ejemplo, energía a hidrógeno) pueden aumentar la flexibilidad en el lado de la oferta mediante el almacenamiento del exceso de generación de las ERV, y en el lado de la demanda mediante la electrificación inteligente de los sectores de uso final. También pueden aumentar la flexibilidad al reducir la congestión de la red.



V. LAS SOLUCIONES A MEDIDA SE CONFECCIONAN USANDO LAS INNOVACIONES COMO COMPONENTES BÁSICOS

El presente estudio destaca 11 soluciones para la integración de las ERV en función de su relevancia y uso cada vez más generalizado, cada una de las cuales combina varias innovaciones. Esta lista, aunque no es exhaustiva, pretende mostrar cómo se pueden integrar las ERV en los distintos países combinando diferentes innovaciones de forma adecuada para cada contexto. La Figura S5 presenta las soluciones de flexibilidad analizadas en el informe.

Las innovaciones no se implementan de forma aislada. Las sinergias entre diferentes innovaciones en todas las dimensiones pueden ofrecer soluciones para la

integración de las ERV. El diseño de una estrategia óptima para integrar elevadas cuotas de ERV y la implementación de diferentes innovaciones dependen del contexto del país. Y las diferentes soluciones ofrecen una mayor flexibilidad en diferentes segmentos del sistema eléctrico, desde los generadores hasta los consumidores.

La Figura S6 muestra el vínculo entre las 30 innovaciones y las 11 soluciones de flexibilidad examinadas en este estudio. Las diferentes innovaciones se han utilizado como componentes modulares para crear soluciones para la integración de las ERV.

Figura S5 Soluciones para flexibilizar el sistema eléctrico.



Nota: ER = Energías renovables

Recuadro 4. Ejemplos de soluciones de flexibilidad implementadas en distintos países.

Flexibilidad de la oferta (Alemania): Además de los generadores convencionales, los generadores de energía renovable, los sistemas de almacenamiento en baterías y las cargas industriales también pueden participar en los mercados de compensación de Alemania desde 2009. Entre 2009 y 2015, el tamaño del mercado de compensación medido en gigavatios se redujo un 20 % y los costos de adquisición de servicios complementarios de OST bajaron un 70 %. En el mismo período, la estabilidad del sistema mejoró y la capacidad instalada de ERV aumentó un 200 %. Esto indica que permitir la participación de recursos energéticos alternativos en los mercados de servicios complementarios puede ayudar a aumentar la estabilidad del sistema y reducir los costos (Wang, 2017).

Flexibilidad de la red (Dinamarca): La gran penetración de la energía eólica se debe en buena parte a la fuerte interconexión de las redes. Dinamarca exporta prácticamente todo su excedente de energía eólica a otras naciones nórdicas que pueden utilizar estas importaciones para desplazar su generación hidroeléctrica y conservar el agua de sus embalses. La red de transmisión interna de Dinamarca es robusta, y su capacidad de interconexión con el resto de Escandinavia y Alemania es casi igual a la carga máxima de 6,5 GW (la capacidad de importación de Alemania es de 2,2 GW, la de Suecia de 2 GW y la de Noruega de 1,6 GW).

Flexibilidad de la demanda (Estados Unidos): Con Edison, una empresa eléctrica de Nueva York, ofrece a sus clientes un descuento por inscribirse en su programa de respuesta a la demanda. El cliente permite que la empresa eléctrica ajuste su termostato un máximo de 10 veces al año (Con Edison, 2016). Del mismo modo, STEM, una compañía con sede en EE. UU., ayuda a sus clientes comerciales e industriales a reducir sus facturas energéticas utilizando la energía almacenada en sus baterías durante los picos de demanda. La compañía combina el almacenamiento en baterías con sistemas de análisis basados en la nube para determinar cuál es el mejor momento para extraer energía de las baterías (Colthorpe, 2017). STEM utiliza su tecnología habilitada con inteligencia artificial (Pickerel, 2018).

Flexibilidad de almacenamiento a escala del sistema completo (Australia): La empresa estadounidense Tesla ha puesto recientemente en servicio una planta de almacenamiento en baterías de ión de litio con una capacidad de 100 MW/129 MWh en el parque eólico situado en Hornsdale (Australia Meridional), de 315 MW. Esta planta se instaló para reafirmar la energía generada por el parque eólico y al mismo tiempo prestar servicios complementarios a la red de Australia Meridional (McConnell, 2017). Otro ejemplo de la flexibilidad de almacenamiento es el proyecto HyStock desarrollado en los Países Bajos, que consiste en un electrolizador de 1 MW y una huerta solar de 1 MW que suministrará parte de la electricidad necesaria para generar hidrógeno. Este proyecto se encuentra cerca de una mina de sal que puede utilizarse a modo de tampón para almacenar el hidrógeno producido por el electrolizador una vez comprimido. Este hidrógeno puede introducirse a continuación en las bombonas de almacenamiento y transportarse a los usuarios finales. En el marco de este proyecto se investiga además cómo utilizar este electrolizador en beneficio del sector eléctrico, por ejemplo, prestando servicios complementarios a la red (EnergyStock, 2018).



Figura S6 Soluciones de flexibilidad creadas mediante la combinación de innovaciones en tecnologías facilitadoras, modelos de negocios, diseño de mercados y operación del sistema

SOLUCIONES DE FLEXIBILIDAD DE LA GENERACIÓN

- **Solución I:**
Reducir la incertidumbre que conlleva la generación de ERV con pronósticos meteorológicos avanzados
 - Internet de las cosas
 - Inteligencia artificial y "Big Data"
 - Aumento de la granularidad temporal en mercados eléctricos
 - Aumento de la granularidad espacial en mercados eléctricos
 - Pronóstico avanzado de la generación de energía renovable variable renovables

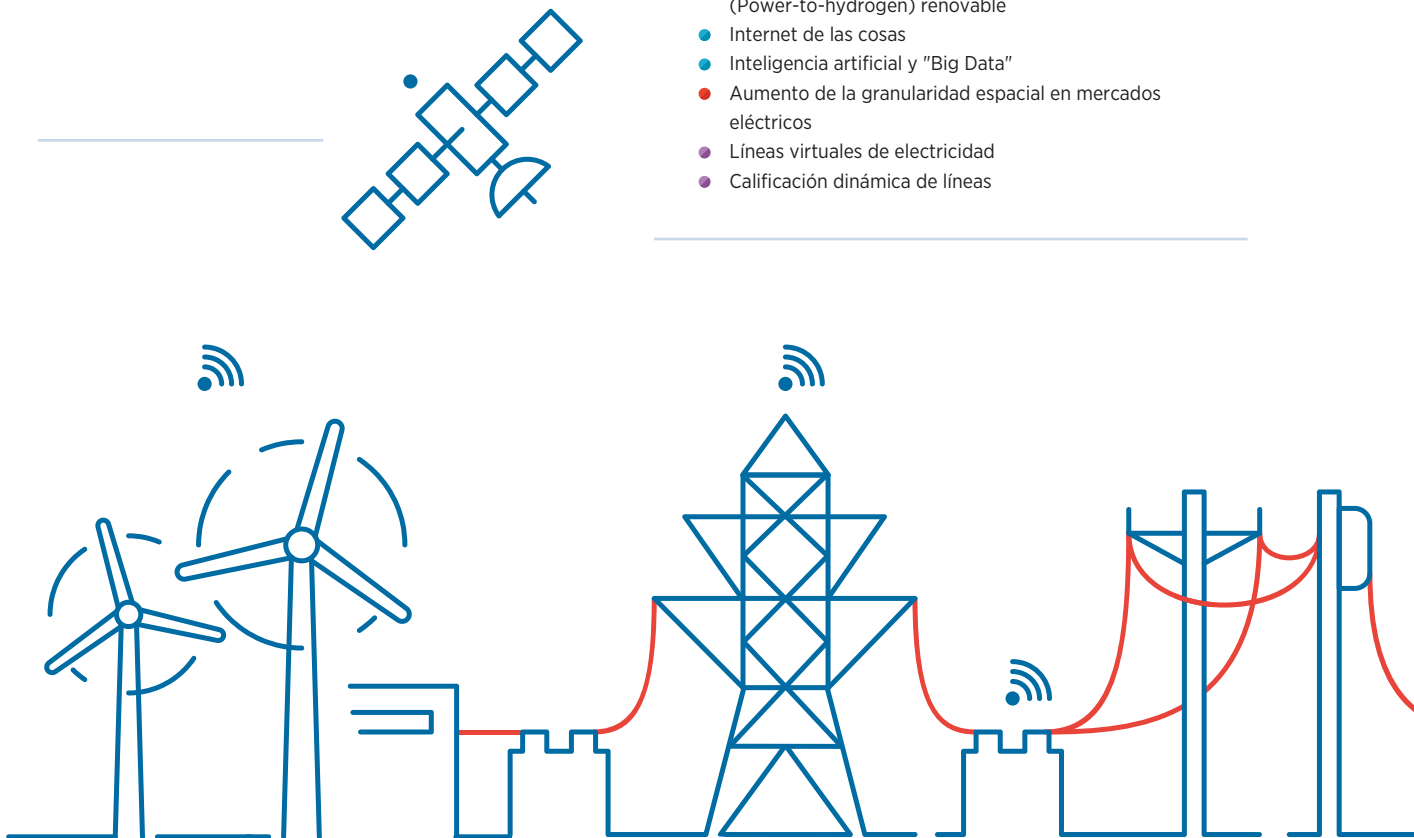
- **Solución II:**
Generación flexible para acomodar variabilidad
 - Flexibilidad en centrales eléctricas convencionales
 - Internet de las cosas
 - Inteligencia artificial y "Big Data"
 - "Blockchain"
 - Aumento de la granularidad temporal en mercados eléctricos
 - Servicios auxiliares innovadores
 - Rediseño de los mercados de capacidad
 - Operación innovadora de almacenamiento hidráulico por bombeo

SOLUCIONES DE FLEXIBILIDAD DE LA RED

- **Solución III:**
Interconexiones y mercados regionales como proveedores de flexibilidad
 - Internet de las cosas
 - Inteligencia artificial y "Big Data"
 - "Blockchain"
 - Mercados regionales
 - Aumento de la granularidad temporal en mercados eléctricos

- **Solución IV:**
Balancear la generación de ER y la demanda a lo largo de grandes distancias con súper redes
 - Súper redes
 - Internet de las cosas
 - Inteligencia artificial y "Big Data"
 - Mercados regionales

- **Solución V:**
Almacenamiento a gran escala y nueva operación de la red para post-poner las inversiones en refuerzos de la red
 - Baterías a gran escala
 - Conversión de energía renovable a calor (Renewable power-to-heat)
 - Conversión de energía renovable a hidrógeno (Power-to-hydrogen) renovable
 - Internet de las cosas
 - Inteligencia artificial y "Big Data"
 - Aumento de la granularidad espacial en mercados eléctricos
 - Líneas virtuales de electricidad
 - Calificación dinámica de líneas



SOLUCIONES DE FLEXIBILIDAD DE LA DEMANDA

- **Solución VI:**
Agregando recursos energéticos distribuidos para proveer servicios de red
 - Baterías detrás del contador
 - Carga inteligente de vehículos eléctricos
 - Conversión de energía renovable a calor (Renewable power-to-heat)
 - Internet de las cosas
 - Inteligencia artificial y "Big Data"
 - "Blockchain"
 - Agregadores ("Aggregators")
 - Integración en el mercado de recursos energéticos distribuidos
 - Servicios complementarios innovadores
 - Cooperación entre transmisiones y operadores del sistema de distribución

- **Solución VII:**
Gestión de la demanda
 - Baterías detrás del contador
 - Carga inteligente de vehículos eléctricos
 - Conversión de energía renovable a calor (Renewable power-to-heat)
 - Internet de las cosas
 - Inteligencia artificial y "Big Data"
 - La energía como servicio
 - Tarifas por tiempo de uso
 - Esquemas de facturación neta
 - Pronóstico avanzado de la generación de energía renovable variable renovables

- **Solución VIII:**
Mini redes de ER proveyendo servicios a la red principal
 - Mini redes renovables
 - Baterías detrás del contador
 - Carga inteligente de vehículos eléctricos
 - Conversión de energía renovable a calor (Renewable power-to-heat)
 - Internet de las cosas
 - Inteligencia artificial y "Big Data"
 - "Blockchain"
 - Comercialización de la electricidad peer-to-peer
 - Modelo de propiedad comunitaria
 - Integración en el mercado de recursos energéticos distribuidos

- **Solución IX:**
Optimizar la operación de sistemas de distribución con recursos energéticos distribuidos
 - Internet de las cosas
 - Baterías detrás del contador
 - Carga inteligente de vehículos eléctricos
 - Inteligencia artificial y "Big Data"
 - Agregadores ("Aggregators")
 - Esquemas de facturación neta
 - Rol futuro de los operadores de sistemas de distribución
 - Líneas virtuales de electricidad

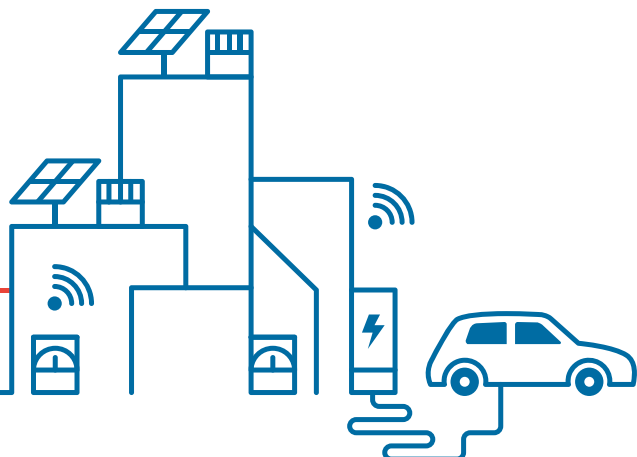
SOLUCIONES DE FLEXIBILIDAD EN TODO EL SISTEMA

- **Solución X:**
Soluciones de baterías a gran escala
 - Baterías a gran escala
 - Internet de las cosas
 - Inteligencia artificial y "Big Data"
 - Agregadores ("Aggregators")
 - Servicios complementarios innovadores
 - Aumento de la granularidad temporal en mercados eléctricos
 - Aumento de la granularidad espacial en mercados eléctricos
 - Rediseño de los mercados de capacidad
 - Líneas eléctricas virtuales

- **Solución XI:**
Soluciones con conversión de electricidad a otras formas de energía (Power-to-X)
 - Conversión de energía renovable a hidrógeno (Power-to-hydrogen) renovable
 - Conversión de energía renovable a calor (Renewable power-to-heat)
 - Inteligencia artificial y "Big Data"
 - Servicios complementarios innovadores
 - Líneas virtuales de electricidad



- **Tecnologías facilitadoras**
 - **Modelos de negocio**
 - **Diseño de mercados**
 - **Operación del sistema**
- Solución



VI. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE SOLUCIONES DE FLEXIBILIDAD.

Los responsables políticos deben reconocer que la implementación de diferentes soluciones plantea diferentes desafíos, como la necesidad de invertir en tecnología y desarrollo de infraestructuras, problemas normativos, complejidad en la coordinación de múltiples partes interesadas y posibles cambios en los roles de los principales actores.

En general, las soluciones que requieren menos inversión en tecnología o infraestructura son aquellas que se basan fundamentalmente en innovaciones relacionadas con la operación del sistema y el diseño mercados. Estas innovaciones pueden incentivar a los actores nuevos y a los ya existentes para responder de manera efectiva a las nuevas condiciones del sistema basadas en los activos existentes. La Tabla 1 ilustra los

desafíos de alto nivel que pueden comportar diferentes soluciones e innovaciones.

La implementación de diferentes soluciones presenta diversos grados de complejidad, igual que el impacto de cada solución para facilitar una alta proporción de ERV. La Figura S7 compara las soluciones según su potencial de flexibilidad y costo, mientras que la Figura S8 las compara en función de sus desafíos no tecnológicos, como la necesidad de cambiar los marcos normativos o reglamentarios, la participación de varios actores en el sector energético, y la aceptación por parte de la ciudadanía. No existe ninguna “solución mágica” que genere un impacto muy elevado con un costo bajo y pocos desafíos; como puede verse en la Figura S7, la inversión que requiere una solución suele

Tabla 1 Desafíos que presenta la implementación de innovaciones.





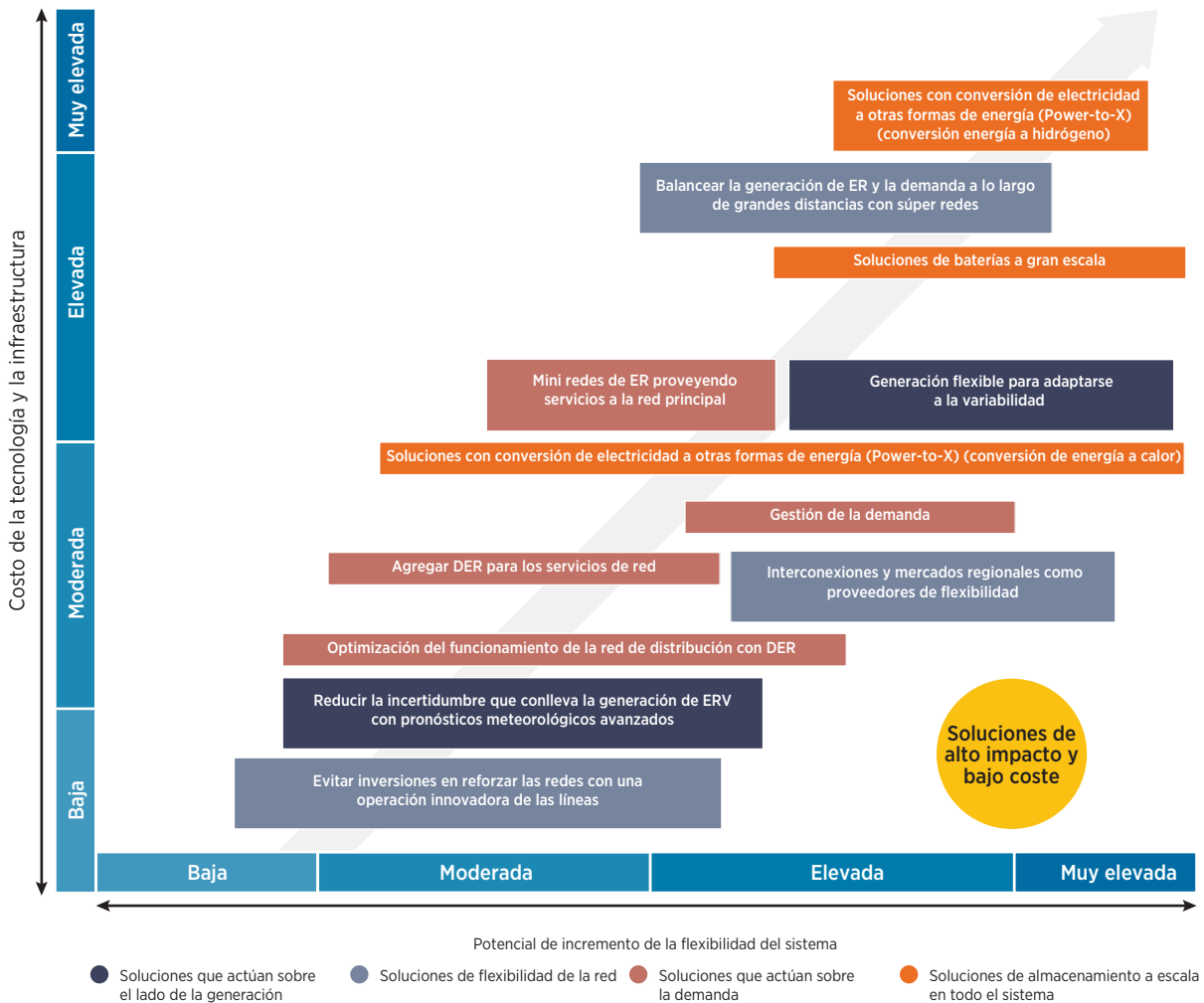
	INVERSIÓN NECESARIA	DESAFÍOS
Tecnologías facilitadoras. 	<ul style="list-style-type: none"> • Inversión elevada en hardware 	<ul style="list-style-type: none"> • Operación de las tecnologías facilitadoras
Modelos de negocio 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitada en hardware, pero elevada en software (puede ser necesario invertir en personal y software) 	<ul style="list-style-type: none"> • Es probable que se necesite un cambio en la regulación • Se deben implementar nuevas tecnologías digitales (como sensores y modelos predictivos)
Diseño de mercados 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitada en hardware, pero elevada en software (<i>por ejemplo</i>, inversión en software en intercambios de electricidad y participantes en el mercado) 	<ul style="list-style-type: none"> • Cambio en el marco regulador • Desafíos políticos • Es posible que se requiera cooperación internacional • Coordinación entre muchas partes interesadas diferentes • Cambio de roles de los actores del sector eléctrico • Debido a que hay ganadores y perdedores, es posible que se requiera algún tiempo para ponerse de acuerdo e implementar
Operación del sistema 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitada en hardware, pero elevada en software (puede ser necesario nuevo software, herramientas, sistemas de control) 	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidad de datos • Manejo de datos • Es posible que se requieran cambios en la regulación

Figura S7 Potencial de flexibilidad de la solución frente al costo de la tecnología



ser directamente proporcional a la flexibilidad potencial que ofrece. Sin embargo, los desafíos no técnicos no presentan exactamente la misma proporcionalidad, como puede verse en la Figura S8. Esto se debe a que cada solución presenta diversos desafíos y resulta difícil realizar comparaciones absolutas. Los desafíos que presenta cada solución dependen de las particularidades del contexto geopolítico y del sistema eléctrico.

La Figura S7 muestra que las baterías a gran escala, las super redes y los electrolizadores para aplicaciones de energía a hidrógeno son tecnologías costosas, pero son soluciones que tienen un gran impacto en la flexibilidad. Sin embargo, existen muchas otras soluciones que ofrecen una flexibilidad significativa a un costo menor. Cada sistema necesita su propia evaluación del nivel de flexibilidad requerido y las sinergias que pueden crearse en su contexto.

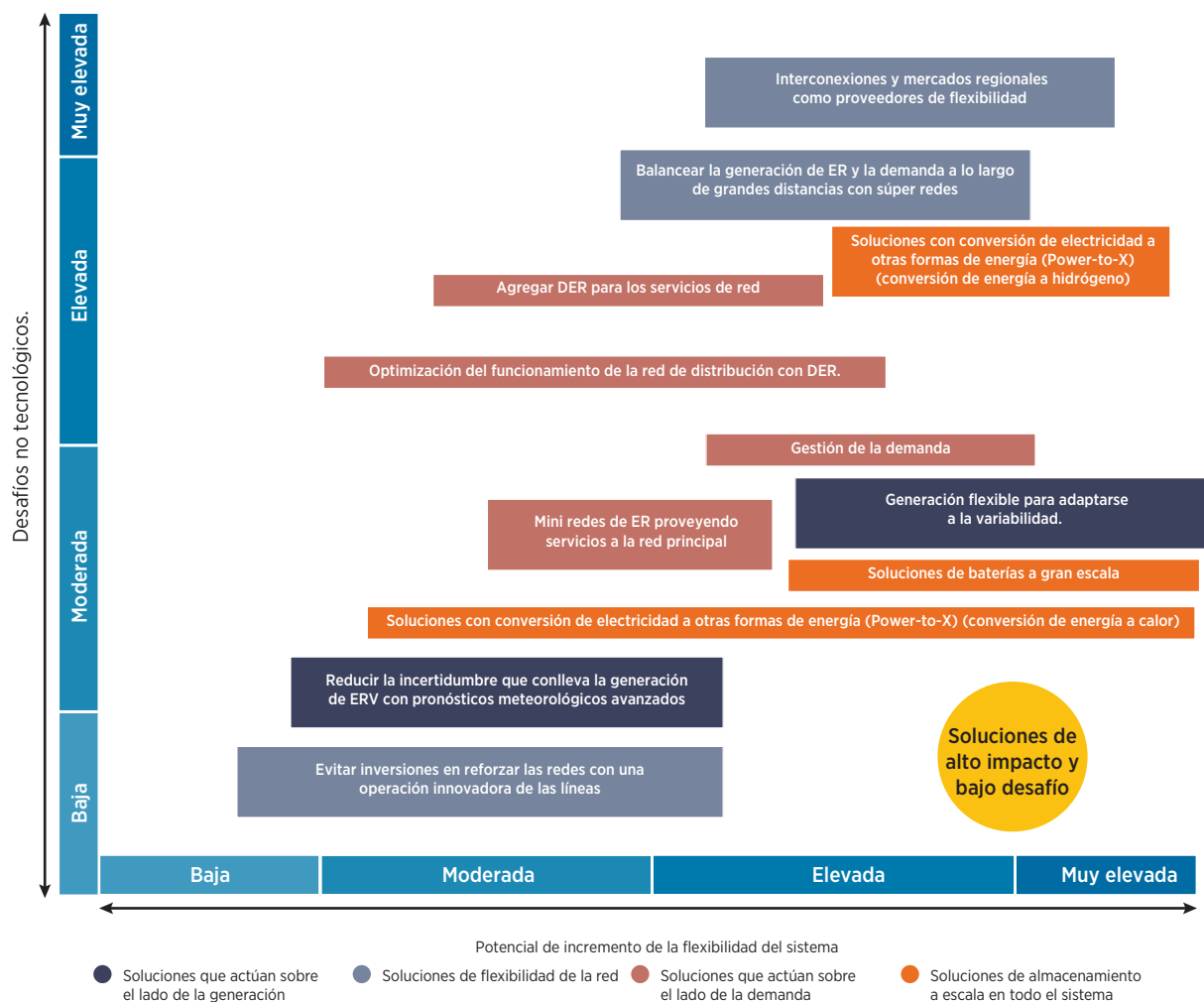
No obstante, podrían crearse sinergias entre las diversas soluciones, lo que reduciría la inversión necesaria si se aplicasen conjuntamente. Por ejemplo, la inversión en tecnologías digitales para que los DER puedan prestar

servicios a la red también facilitaría la gestión de la demanda. La inversión en soluciones de energía a calor —como las bombas de calor residenciales— aumentaría el impacto de las soluciones que actúan sobre la demanda, lo que mejoraría la eficiencia de la gestión de la demanda, prestaría servicios a la red y facilitaría que el operador del sistema de distribución (OSD) optimizasen la operación del sistema.

Una importante dificultad que plantean muchas soluciones innovadoras, incluida en los desafíos no tecnológicos de la Figura S8, son los cambios en los roles y responsabilidades de los actores implicados. Por ejemplo, las soluciones de flexibilidad de la demanda implican un cambio de rol de los consumidores y la modificación de los patrones de consumo.

Para que los DER puedan integrarse y favorecer la flexibilidad de la demanda, es necesario cambiar el rol del operador del sistema de transmisión (OST) y, lo que es más importante, el rol del OSD. Cambiar el rol de los actores del sistema es un desafío importante, ya que para lograrlo hacen falta incentivos y modelos de negocio

Figura S8 Potencial de flexibilidad de la solución frente a los desafíos no tecnológicos



Nota: Los desafíos no tecnológicos incluyen los cambios normativos requeridos, la necesidad de cambiar los roles de los actores y otros desafíos.

adecuados. En otros casos, la configuración política y el entorno internacional son a menudo un desafío particular para la cooperación externa, establecer roles y responsabilidades entre sistemas y poner el beneficio regional por delante del nacional. Quizá sean estos los obstáculos más importantes para establecer mercados o acuerdos regionales que funcionen bien a través de interconexiones.

De manera más general, las Figuras S7 y S8 muestran que las **soluciones centradas en la demanda y basadas en innovaciones relacionadas con el diseño de mercados tienen costos más bajos** y un impacto entre moderado y alto en la integración de las ERV. Por este motivo son una opción atractiva en muchos países y, por lo tanto, un buen punto de partida. Las soluciones

que hacen un uso más intensivo de **tecnologías facilitadoras —como las redes, el almacenamiento y las innovaciones en conversión de energía renovable a otras formas de energía, “Power-to-X”— requieren una mayor inversión, pero también pueden tener mayor impacto en la integración de las ERV**. Esto las hace más adecuadas para etapas avanzadas, en las que las ERV registran una penetración significativa en el sistema eléctrico de un país. Sin embargo, los marcos normativos deben anticipar los aspectos de regulación y de planificación de infraestructuras que son esenciales para que la implementación de estas soluciones tenga éxito en una etapa posterior.

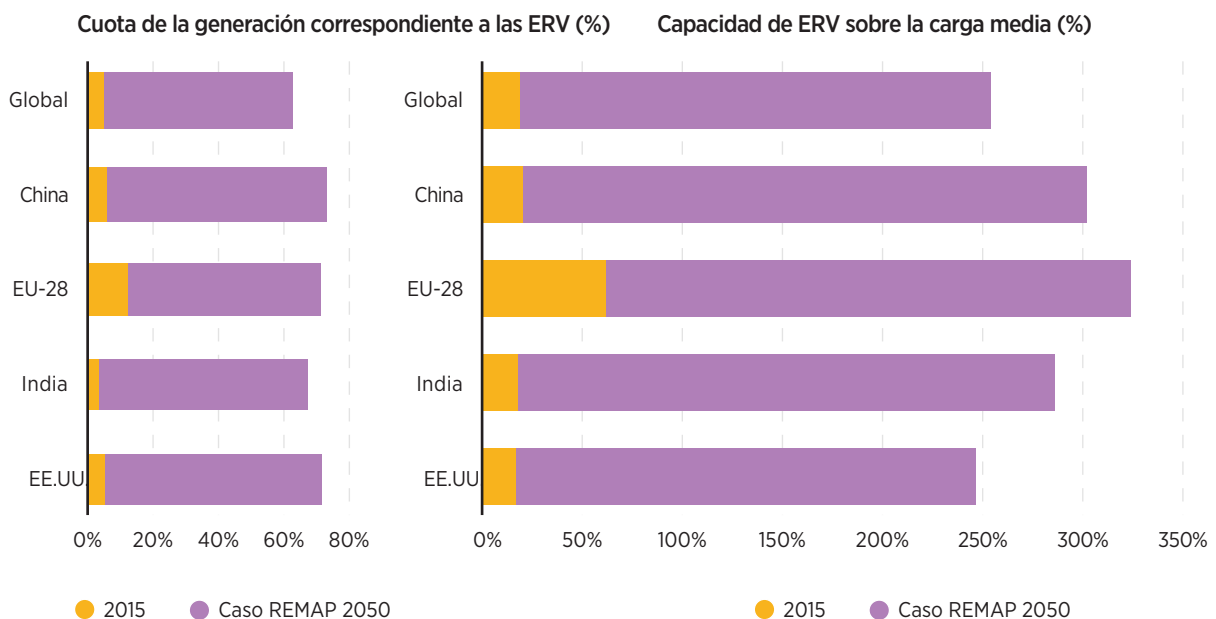
VII. INNOVACIONES PARA REDUCIR LOS COSTOS DEL SISTEMA Y MAXIMIZAR LOS BENEFICIOS.

A nivel mundial, en un escenario compatible con el Acuerdo de París, la participación de las ERV en la generación de electricidad supera el 60 % en 2050, y es todavía mayor en varios países, como puede verse en la Figura S9. Un aspecto más importante para los sistemas eléctricos es que, durante los picos de generación de ERV, el suministro de electricidad podría exceder de forma significativa la capacidad de carga del sistema eléctrico en muchos países. Los sistemas flexibles y los enfoques inteligentes pueden ayudar a utilizar este

excedente de electricidad renovable, reduciendo al mínimo los desafíos adicionales para la infraestructura y la operación de los sistemas eléctricos.

Con el objetivo de lograr una transformación global rentable que produzca un sistema energético bajo en carbono, sostenible, confiable e inclusivo, las estrategias deben minimizar los costos relacionados con la integración de las ERV y maximizar los beneficios asociados.

Figura S9 Participación de las ERV en la generación de electricidad total y capacidad de ERV sobre la carga media, correspondiente a determinados países en 2015 y 2050 en un escenario compatible con el Acuerdo de París



Fuente: IRENA, de acuerdo con datos de REMap.

La falta de una planificación adecuada para la integración de las ERV en los sistemas eléctricos puede dar lugar a severas restricciones que aumenten los costos del sistema. Una planificación sólida que anticipe los requisitos del sistema y las soluciones de flexibilidad emergentes aumentará los beneficios de la generación de ERV de bajo costo (IRENA, 2017c), como se indica en la Figura S10.

El análisis de IRENA concluye que el nivel de inversión en refuerzo de la infraestructura de la red, almacenamiento y generación convencional flexible que hace falta para la integración de las ERV es de un orden de magnitud similar al de la inversión total requerida en tecnologías adicionales de generación de energía renovable. Se estima que estas inversiones alcanzarán los 18 billones USD entre 2015 y 2050, en un escenario acorde con el Acuerdo de París, suponiendo que se implementen opciones de flexibilidad limitada (IRENA, 2018c). Esto pone de relieve la importancia de la innovación para reducir costos y aumentar los beneficios de la integración de una elevada proporción de ERV en los sistemas eléctricos.

El informe revela que la **innovación en el sistema eléctrico puede reducir el costo de integración de las ERV con soluciones que incrementen la flexibilidad del sistema**. Este concepto se ilustra en la Figura S11. La referencia es un sistema que actualmente presenta un bajo porcentaje de ERV y con restricciones significativas para aumentar dicho porcentaje. Implementar soluciones de flexibilidad ayuda a mover las curvas de costo a la derecha del gráfico, de modo que, a igual nivel de inversión, se puede lograr una mayor proporción de ERV. Las soluciones de diseño de mercados y operación del sistema tienen costos de implementación más bajos y son una buena oportunidad para comenzar. Otras soluciones basadas en nuevos modelos de negocio y tecnologías facilitadoras requieren la participación de más actores y una mayor inversión, pero confieren mayor flexibilidad a los sistemas eléctricos.

Sin embargo, como ya se ha indicado, es necesario combinar la innovación en diseño de mercados, operación del sistema, modelos de negocio y tecnologías facilitadoras para lograr altos niveles de integración de las ERV.

Figura S10 Innovación para maximizar los beneficios del sistema.

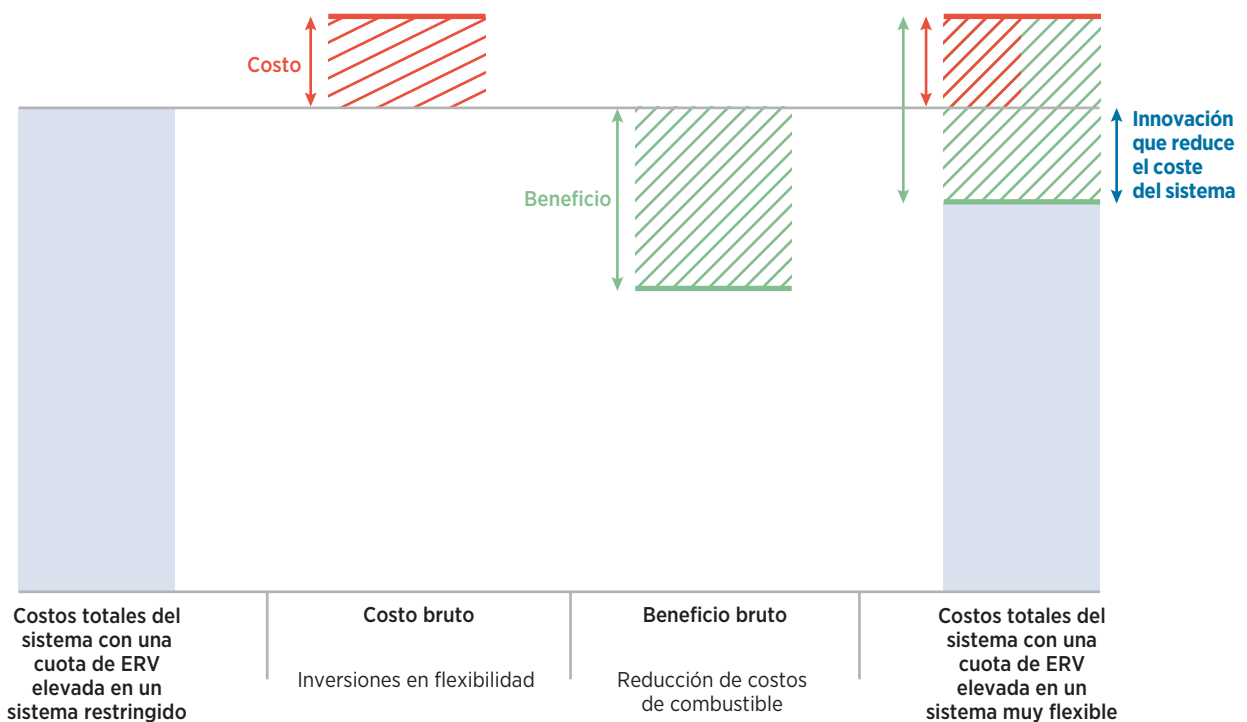
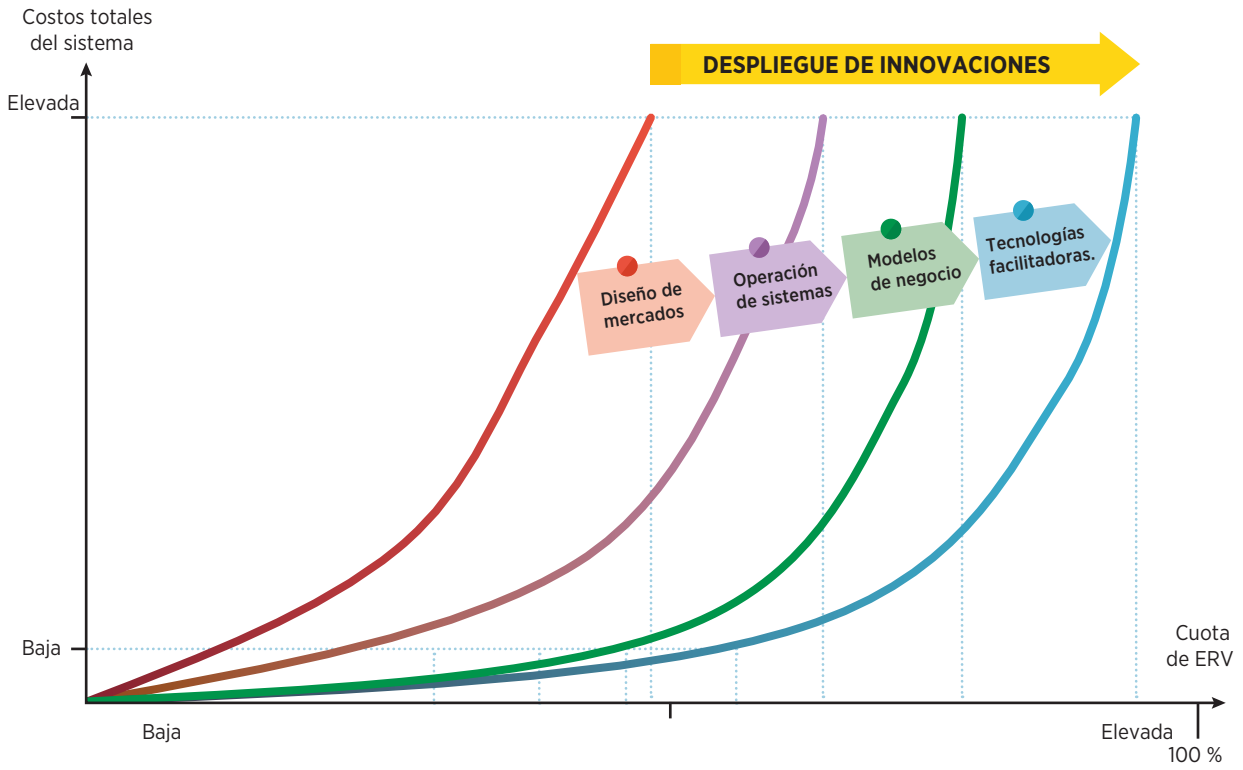


Figura S11 Concepto de innovación para reducir los costos totales del sistema con elevadas cuotas de ERV



Cuanto más soluciones innovadoras se implementen, mayor será la cuota de ERV integrada y menores los costos del sistema



VIII. PLAN DE INNOVACIÓN DE OCHO PASOS PARA LA TRANSFORMACIÓN DEL SECTOR ELÉCTRICO

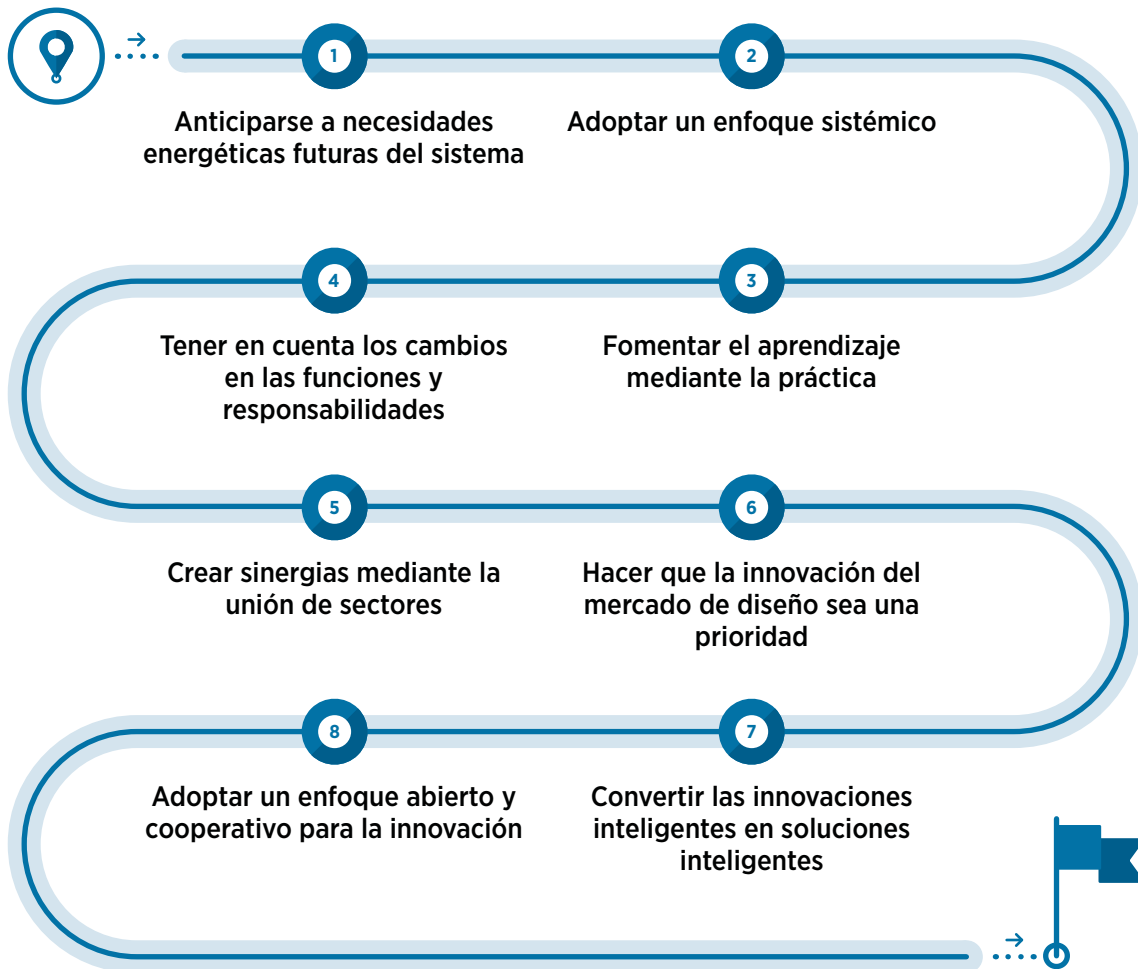
Los sistemas eléctricos están cambiando debido a los imperativos políticos y la innovación acelerada. Las tecnologías ERV, como la eólica y la solar fotovoltaica, se están posicionando en el centro de la transformación gracias a su sólido modelo de negocio. Las innovaciones que están poniéndose a prueba en los países más avanzados muestran que los sistemas eléctricos pueden operar con una participación muy alta de ERV de manera confiable y económica. Sin embargo, existe una gran brecha entre los líderes y la mayoría de los seguidores en la integración de las ERV. Aunque el sector privado continuará presentando nuevas soluciones para acelerar la transformación energética, el papel de los gobiernos es crucial para facilitar y orientar al sector en consonancia con los objetivos socioeconómicos nacionales. Para cerrar esta brecha, los países que desean obtener el máximo beneficio de la energía renovable para sus economías deberán adoptar las siguientes medidas recomendadas (Figura S12).

1 Desarrollar marcos de políticas con visión de futuro que se anticipen a las necesidades futuras del sistema eléctrico. Para conseguir una integración rentable de las ERV a escala, es necesario conciliar las necesidades actuales (enfocadas al despliegue de tecnologías de generación renovable) con las necesidades futuras (enfocadas a la integración de elevadas cuotas de ERV). Existen concesiones difíciles entre las victorias rápidas y las estrategias a largo plazo. Para conseguir altos niveles de implementación e integración de las energías renovables, los responsables políticos no deberían considerar los éxitos a corto plazo de forma aislada. Deben mirar adelante, hacia un futuro en el que se haya logrado implementar la energía renovable, y deben diseñar los mercados y sistemas para dicho futuro.

2 Adoptar un enfoque sistémico, que reúna innovaciones en tecnología, diseño de mercado, modelos de negocio y operación. Es crucial aprovechar las sinergias entre innovaciones en todos los sectores y componentes del sistema, e involucrar a todos los actores. Las soluciones innovadoras trazadas en este informe muestran que las soluciones adaptadas al contexto y las necesidades del país pueden construirse combinando innovaciones en tecnologías facilitadoras, diseño de mercado, operación del sistema y modelos de negocios. Su implementación para flexibilizar el sector eléctrico se traduciría en menores costos para integrar las ERV y, de este modo, favorecer la transformación energética. También existen sinergias potenciales entre las diferentes soluciones, lo que puede reducir las necesidades de inversión cuando se implementan conjuntamente.

3 Fomentar el aprendizaje a través de pruebas y demostraciones continuas. No podemos predecir un prototipo único de sistema eléctrico del futuro. La innovación implica, necesariamente, fallar, pero los sistemas de energía no pueden fallar: las luces deben permanecer encendidas y debemos entender qué soluciones funcionan y cuáles no, en el contexto de cada país. Esto hace que aprender con la práctica, mediante pruebas y demostraciones, sea de suma importancia para mitigar el riesgo. La capacidad de los diferentes actores para asumir riesgos varía: las empresas emergentes (por ejemplo, los nuevos participantes) pueden correr mayores riesgos y tener más margen para fallar. Por lo tanto, es importante contar con un enfoque de innovación abierto para permitir que las empresas emergentes resuelvan

Figura S12 Plan de innovación de ocho pasos para la transformación del sector eléctrico



problemas y aporten soluciones. Hay que contar con un margen reglamentario que permita niveles de experimentación; un ejemplo es la creación de entornos de pruebas (*sandboxes*) que permitan a los actores experimentar y probar innovaciones sin estar restringidos por el entorno regulador.

- 4 Tener en cuenta los cambios de roles y responsabilidades en la operación del sistema eléctrico.** La creciente penetración de los recursos energéticos descentralizados y el surgimiento de nuevos actores del mercado, como los prosumidores y los consumidores activos, dará inicio a una nueva era. Los gobiernos y las empresas necesitan conocer mejor las necesidades y expectativas de los consumidores y de las comunidades, así como su disposición para adoptar innovaciones, y adaptar las soluciones en consecuencia. Es probable que algunos consumidores estén dispuestos a desempeñar un papel activo en el

sistema energético, pero los beneficios deben ser claros y se necesita automatización para que las respuestas sean simples. Además, los OSD tendrán que adaptar su rol actual y transformar su modelo de negocio para convertirse en un operador de sistemas en lugar de un mero planificador de redes. Se requiere una mayor cooperación con los operadores de sistemas de transmisión para aumentar la visibilidad de los nuevos recursos de energía distribuidos que están conectados y que podrían proporcionar servicios al sistema.

- 5 Hacer de la innovación en el diseño del mercado una prioridad, ya que fomenta la flexibilidad a un costo relativamente bajo.** Las soluciones de diseño de mercado para ERV han demostrado ser soluciones muy impactantes y de bajo costo, lo que las convierte en la primera opción para enfocar esfuerzos. Algunos mercados y regulaciones en el ámbito de la energía muestran cómo se pueden

adaptar los mercados a las necesidades de los sistemas eléctricos con mayores cuotas de ERV, y responder a las tendencias de digitalización, descentralización y electrificación. Los mercados observan que el valor que se medía en kilovatios por hora está pasando a determinarse en función de la flexibilidad para acomodar más ERV de bajo costo. Lo que cohesionan todo esto es un mercado que valora adecuadamente los servicios energéticos y de compensación, y que remunera a todos los actores que pueden proporcionar flexibilidad. Para obtener diseños de mercado holísticos y rentables es necesaria una planificación adecuada que tenga en cuenta la transformación energética. Por el contrario, las soluciones basadas en conseguir éxitos a corto plazo y poner parches generarían costos elevados a largo plazo. La mejora gradual de los precios del mercado de la energía es esencial, independientemente de las soluciones a corto plazo que puedan adoptarse.

6 Crear sinergias entre la oferta de energías renovables y la movilidad eléctrica, la calefacción y la refrigeración.

Se pueden aprovechar las valiosas sinergias existentes entre la energía renovable y la descarbonización de los sectores de uso final a través del acoplamiento sectorial. Las estrategias de electrificación deben planificarse con cuidado y ejecutarse de manera inteligente, manteniendo estrechas relaciones con las estrategias de despliegue acelerado de las energías renovables y teniendo en cuenta los cambios sociales generales.

7 Convertir las innovaciones inteligentes en soluciones inteligentes mediante tecnologías digitales.

Las innovaciones digitales (inteligencia artificial, Internet de las cosas, blockchain, etc.) están comenzando a influir significativamente en los sistemas eléctricos, de muchas maneras diferentes. Aún no se comprenden del todo ni sus implicaciones para los modelos y actores establecidos, ni sus riesgos. Las tecnologías existen, pero las aplicaciones inteligentes todavía

son limitadas. Los sistemas energéticos deberían hacer un uso mucho mayor de la "inteligencia" que permiten las innovaciones digitales. Cabe destacar que otros sectores industriales han aplicado tecnologías digitales (casi) al máximo potencial, proporcionando conocimientos que podrían transferirse al sector eléctrico. Se necesitan muchos más programas piloto y la implementación de soluciones habilitadas digitalmente en una amplia gama de circunstancias.

8 Adoptar un enfoque abierto y cooperativo para la innovación.

La innovación debe involucrar a diferentes actores, tanto del sector público como del privado, y de los países desarrollados y en desarrollo. El conocimiento y la experiencia deberían compartirse más ampliamente. Existen grandes oportunidades de aprender más de otros sectores y de diferentes jugadores. La interacción con otros segmentos industriales que antes no se consideraban parte del sector energético podría brindar grandes oportunidades para aprovechar las sinergias. La innovación debe ir acompañada de un enfoque sostenible e inclusivo.

El informe muestra que se están implementando o probando multitud de innovaciones que pueden facilitar la integración de las ERV en todo el mundo. Además, esas soluciones pueden adaptarse a las necesidades y circunstancias de casi cualquier país. Los marcos normativos que aceptan y favorecen la adopción de soluciones innovadoras son cruciales para obtener todos los beneficios que reporta la energía renovable de bajo costo.

El éxito de la transformación energética requiere que la innovación forme parte de un amplio conjunto de políticas educativas y formativas, industriales, laborales y de inversión, entre otras. Armados con el conocimiento de las opciones disponibles, los responsables de la planificación del sistema energético y los órganos de decisión podrán trabajar tranquilamente para allanar el camino a un futuro impulsado por las energías renovables.

ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

IA	inteligencia artificial
BtM	detrás del contador (<i>behind the meter</i>)
CSP	energía solar concentrada (<i>concentrated solar power</i>)
DER	recursos energéticos distribuidos (<i>distributed energy resources</i>)
OSD	operador del sistema de distribución
VE	vehículo eléctrico
IdC	internet de las cosas
IRENA	Agencia Internacional de Energías Renovables
PHS	pumped hydro storage
FV	fotovoltaica
P2P	peer-to-peer
ER	energías renovables
OST	operador del sistema de transmisión
ERV	energías renovables variables
V2G	del vehículo a la red (<i>vehicle-to-grid</i>)

UNIDADES DE MEDIDA

GW	gigavatio
MW	megavatio
MWh	megavatios-hora
TWh	teravatios-hora
yr	year

REFERENCIAS

- COLTHORPE, A.** (2017), “Stem connects 1MW aggregated virtual power plant in Hawaii”, *Energy Storage News*, www.energy-storage.news/news/stem-connects-1mw-aggregated-virtual-power-plant-in-hawaii.
- CON EDISON** (2016), “A smarter way to control your comfort”, Con Edison, [www.coned.com/en/save-money/rebates-incentives-tax-credits/rebates-incentives-tax-credits-for-residential-customers/bring-your-thermostat-and-get-\\$85](http://www.coned.com/en/save-money/rebates-incentives-tax-credits/rebates-incentives-tax-credits-for-residential-customers/bring-your-thermostat-and-get-$85).
- EIRGRID AND SONI** (2018), *Annual Renewable Energy Constraint and Curtailment Report 2017*, EirGrid and System Operator for Northern Ireland, Dublin and Belfast, www.eirgridgroup.com/site-files/library/EirGrid/Annual-Renewable-Constraint-and-Curtailment-Report-2017-Non-Technical-Summary-V1.pdf.
- ELIA** (2018), “Deployment of a datahub shared by all system operators to support electrical flexibility”, www.elia.be/-/media/files/Elia/PressReleases/2018/20180308_SYN_Persbericht_Datahub_EN.pdf.
- ENERGYSTOCK** (2018), “The hydrogen project HyStock”, EnergyStock, www.energystock.com/about-energystock/the-hydrogen-project-hy-stock.
- EPHA** (2018), “Press Release: Ongoing growth: heat pump sector continues its positive contribution to Europe’s energy and climate targets”, European Heat Pump Association, <https://www.ehpa.org/about/news/article/press-release-ongoing-growth-heat-pump-sector-continues-its-positive-contribution-to-europes-ene/>.
- GOGLA** (2017), *Global Off-Grid Solar Market Report Semi-Annual Sales and Impact Data*, Global Off-grid Lighting Association, Utrecht, www.gogla.org/sites/default/files/resource_docs/gogla_sales-and-impact-reporth12017_def.pdf.
- IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY)** (2018), *World Energy Outlook 2018*, OECD/IEA, Paris, p. 528.

- IRENA** (2018a), *Power System Flexibility for The Energy Transition. Part 1: Overview for Policy Makers*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA** (2018b), *Renewable Power Generation Costs in 2017*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, www.irena.org/publications/2018/Jan/Renewable-power-generation-costs-in-2017.
- IRENA** (2018c), *Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA_Report_GET_2018.pdf.
- IRENA** (2017a), *Renewable Energy Statistics 2017*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA** (2017b), *Adapting Design to Shares of Variable Renewable Energy*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA** (2017c), *Planning for the Renewable Future: Long-term Modelling and Tools to Expand Variable Renewable Power in Emerging Economies*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- IRENA, IEA AND REN21** (2018), *Renewable Energy Policies in a Time of Transition*, IRENA, OECD/IEA and REN21.
- McCONNELL** (2017), “SA’s battery is massive, but it can do much more than store energy”, ABC News, www.abc.net.au/news/2017-12-05/yes-sa-battery-is-a-massive-battery-but-it-can-do-more/9227288.
- QUARTZ AFRICA** (2018), “The global leader in pay-as-you-go solar power is downsizing to stay profitable”, <https://qz.com/africa/1229170/m-kopa-solar-lays-off-kenya-uganda-staff-as-it-restructures/>.
- NISSAN NEWSROOM EUROPE** (2018), “Nissan and Enel launch groundbreaking vehicle-to-grid project in the UK”, <https://uk.nissannews.com/en-GB/releases/release-145248-nissan-and-enel-launch-groundbreaking-vehicle-to-grid-project-in-the-uk?query=nissan+at+paris+motor+show+2014>.
- PICKEREL** (2018), “Urban Energy Solutions and SunGreen Systems will use Stem’s AI solutions in solar+storage projects”, www.solarpowerworldonline.com/2018/09/urban-energy-solutions-and-sungreen-systems-will-use-stems-ai-solutions-in-solarstorage-projects/.
- RTE** (2018), “Denmark on track to have 50% renewable energy by 2030”, www.rte.ie/news/newslens/2018/0111/932573-denmark-wind-farm/.
- SOLSHARE** (2017), “Step by step”, www.solshare.com/how-it-works/.
- STATISTA** (2018), “Internet of Things (IoT) connected devices installed base worldwide from 2015 to 2025 (in billions)”, www.statista.com/statistics/471264/iot-number-of-connected-devices-worldwide/.
- UNFCCC** (2018), *ME SOLshare: Peer-to-Peer Smart Village Grids in Bangladesh*, United Nations Framework Convention on Climate Change, <https://unfccc.int/climate-action/momentum-for-change/ict-solutions/solshare>.
- WANG** (2017), *Ancillary Services: An Introduction*, CNREC, <http://boostre.cnrec.org.cn/index.php/2017/09/14/ancillary-services-an-introduction/?lang=en>.



PANORAMA DE LA INNOVACIÓN PARA UN FUTURO IMPULSADO POR LAS ENERGÍAS RENOVABLES: SOLUCIONES PARA INTEGRAR LAS ENERGÍAS RENOVABLES VARIABLES

© IRENA 2019

SEDE DE IRENA

P.O. Box 236, Abu Dabi
Emiratos Árabes Unidos

www.irena.org

