Tecnologías de hibridación renovable: marco regulatorio, reducción de costes obtenidos y derechos de propiedad industrial

Renewable hybridization technologies: regulatory framework, reduction of costs obtained and intellectual property rights

Francisco Javier Moledo Frojan[1*], Claudia Sáez Durán[2] y Ane Moledo Uribe[3**]

Resumen

El objetivo principal de este trabajo es la evaluación de la reducción de costos que se logra o se puede lograr al implementar la hibridación en instalaciones de energía renovable. Para ello, se procederá con una revisión exhaustiva de la literatura especializada para identificar y analizar los factores económicos y las estrategias que respaldan estos ahorros.

Asimismo, dentro de los objetivos de esta investigación se encuentran la identificación y localización de patentes relacionadas con la hibridación de fuentes de energía renovable. Este aspecto es de suma importancia, ya que permite conocer las innovaciones tecnológicas y las soluciones técnicas que se han desarrollado en este campo, lo que, a su vez, contribuye a la comprensión integral de la evolución y del estado actual de esta área de investigación.

En resumen, este trabajo se propone como una contribución significativa para el conocimiento en el campo de la hibridación de energías renovables, al evaluar los aspectos económicos involucrados y rastrear las patentes relevantes, con el objetivo de proporcionar una visión completa y actualizada de esta técnica y sus aplicaciones en el contexto de la transición hacia fuentes de energía más sostenibles.

Palabras clave

Hibridación, energías renovables, capex, opex, patente.

Abstract

The main objective of this work is the evaluation of the cost reduction that is achieved or can be achieved by implementing hybridization in renewable energy facilities. For this purpose, a thorough review of the specialized literature will be carried out to identify and analyse the economic factors and strategies that support these savings.

Likewise, the identification and location of patents related to the hybridization of renewable energy sources are within the objectives of this research. This aspect is of utmost importance, since it allows us to know the technological innovations and technical solutions that have been developed in this field, which, in turn, contributes to the comprehensive understanding of the evolution and current state of this area of research.

In summary, this work is proposed as a significant contribution to knowledge in the field of hybridization of renewable energies, by evaluating the economic aspects involved and tracking the relevant patents, with the aim of providing a complete and updated view of this technique and its applications in the context of the transition towards more sustainable energy sources.

Keywords

Hybridization, renewable energies, capex, opex, patent.

Recibido/*received*: 27/01/2025. Aceptado/*accepted*: 28/02/2025.

1 Profesor doctor ingeniero industrial.
2 Máster en Ingeniería Energética Sostenible.
3 Estudiante de grado en Tecnologías Industriales.
*Universidad del País Vasco. Escuela de Ingeniería de Bilbao. Plaza Ingeniero Torres Quevedo, 1. 48013 Bilbao.
** Universidad Antonio de Nebrija, Escuela Politécnica Superior, C. de Sta. Cruz de Marcenado, 27, Centro, 28015 Madrid

Autor para correspondencia: Francisco Javier Moledo Frojan; e-mail: franciscojavier.moledo@ehu.eus

Foto: Shutterstock.

MARCO REGULATORIO DE LAS TECNOLOGÍAS DE HIBRIDACIÓN RENOVABLE

Se analizan a continuación las regulaciones establecidas en algunos países europeos con respecto a los sistemas híbridos y su acceso y conexión a la red eléctrica, así como en el marco nacional.

Marco regulatorio europeo sobre tecnologías de hibridación renovable

En la Unión Europea (UE) no existe un marco regulatorio específico a nivel técnico ni objetivos establecidos para la hibridación de tecnologías renovables. Sin embargo, sí que está permitida la instalación de este tipo de parques de generación de energía renovable al estar reglamentados los requerimientos de conexión de red necesarios al añadir nuevos módulos de generación a una instalación existente. De acuerdo con las más recientes actualizaciones del Reglamento 2019/943 sobre el mercado interior de la electricidad y la Directiva 2019/944, que establece normas comunes para el mercado interior de la electricidad, estas representan un marco general en el que no detallan la definición ni se promueven explícitamente las nuevas tecnologías de hibridación, aunque tenga un enfoque definido en el fomento de la flexibilidad en las redes y sostenibilidad del sistema, además de estimular el autoconsumo.

La UE también ha establecido el Mecanismo Conectar Europa (CEF) para facilitar la financiación de proyectos de infraestructura energética, incluidos los proyectos de energías renovables y la hibridación. El CEF está enfocado en la mejora y la interconexión de las redes energéticas en toda la UE, con el fin de lograr un sistema energético más eficiente y sostenible y, de esta manera, fortalecer la seguridad energética, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y fomentar el desarrollo económico sostenible. Asimismo, la UE ha estado impulsando la integración de diversas fuentes de energía renovable mediante la investigación y la financiación de proyectos a través de programas como Horizonte 2020 y el Fondo Europeo para Inversiones Estratégicas (EFSI).

La responsabilidad de las competencias en energía está asignada de forma conjunta entre la UE y los Estados miembros. La UE permite a estos legislar en aquellos aspectos en los que la propia UE no haya propuesto legislación o no hayan quedado completamente definidos, dejando espacio para su regulación a nivel nacional. Estos principios son especialmente relevantes en este caso, dado que, si bien la Unión Europea permite la hibridación eléctrica renovable, es necesario que cada Estado miembro desarrolle su enfoque para que la hibridación renovable se adapte a las particularidades de su mercado y a los objetivos compartidos.

A continuación, se detallan algunas de las regulaciones y normativas establecidas por parte de algunos de los Estados miembros de la UE de acuerdo con la hibridación de energía renovable, como las relacionadas con el acceso y la conexión a la red eléctrica.

En Francia, se ha establecido un esquema llamado S3REnR47 para el reparto de costes de conexión a la red entre las instalaciones renovables en cada región. El organismo regulador (CRE) ha emitido directrices de obligado cumplimiento a los gestores de red que incluyan las instalaciones híbridas en este esquema, así como el almacenamiento. El objetivo es que el aumento de la potencia debido al almacenamiento no genere costes adicionales. Además, se plantea la necesidad de cuantificar y establecer

incentivos específicos para el almacenamiento de energía, con el objetivo de reconocer sus efectos beneficiosos en la gestión de la red eléctrica.

Grecia, por su parte, cuenta con la Ley 4495/2017 en la que se establecen los procedimientos a llevar a cabo para la construcción y la operación de proyectos piloto que integren tecnologías renovables y almacenamiento de energía. Por otro lado, elaboraron la Ley 4643/2019 que tiene como objetivo simplificar el proceso de obtención de licencias para instalaciones híbridas, y se dejó la autorización de condiciones y procedimientos en manos del Ministerio de Energía, para adaptarse a la situación específica de cada proyecto. Además, incluye modificaciones que facilitan la financiación de proyectos híbridos ubicados en islas que no están conectadas a la red nacional.

Irlanda ha establecido grupos de trabajo en el marco de la iniciativa FlexTech en los que colaboran el Operador del Sistema de Transmisión de Irlanda (EIRGRID) y el Operador del Sistema de Transmisión de Irlanda del Norte (SONI), con el objetivo de desarrollar regulaciones, abordando temas clave como hibridación, almacenamiento, gestión de la demanda y generación a pequeña escala. Por otro lado, se está evaluando el aumento de la potencia instalada en más del 120 % en instalaciones existentes sin modificar la capacidad máxima del punto de conexión y desarrollar mecanismos para conmutar capacidad de evacuación entre instalaciones con el mismo punto de conexión. Además, están analizando mecanismos para compartir un único punto de conexión entre entidades legales separadas.

En Polonia se están llevando a cabo subastas por lotes tecnológicos, incluyendo una específica para instalaciones híbridas renovables, en las que si no se logran los factores de carga establecidos o los déficits de generación, se penaliza a la instalación. De esta manera, se consigue reducir el riesgo para instalaciones con perfiles de generación más estables, como pueden ser las centrales multicombustible, hidráulicas e híbridas renovables.

En el año 2019, National Grid, el Operador del Sistema en el Reino Unido, planteó una propuesta para revisar los cargos de conexión a la red de transporte (conocidos como TNUoS charges) con el objetivo de adaptarlos a las instalaciones híbridas. De esta manera, aplica una reducción de los cargos de conexión de los sistemas de almacenamiento a la red de transporte con el fin de favorecer su integración.

Marco regulatorio nacional sobre tecnologías de hibridación renovable

En el caso de las regulaciones nacionales establecidas en el ámbito de la hibridación renovable, se pueden descartar dos reales decretos que han impulsado la implantación de este tipo de tecnologías:

- Real Decreto 23/2020, de 23 de junio, por el que se aprueban medidas en materia de energía y en otros ámbitos para la reactivación económica. (RD 23/2020). Conforme al Real Decreto Ley 23/2020, de 23 de junio, en él se ha establecido la opción de llevar a cabo proyectos de hibridación en instalaciones de generación existentes manteniendo el punto de conexión y la capacidad de acceso. Por tanto, permite tanto la combinación de diferentes tecnologías o con una misma tecnología, como la instalación de una potencia superior a la que puede ser evacuada en un momento determinado siempre y cuando sea técnicamente posible y se respeten los límites de evacuación durante su operación. Además, el RD 23/2020 especifica que para realizarse, a solicitud de un permiso de acceso de la instalación, al menos una de las fuentes de energía debe ser de origen renovable o debe incorporar almacenamiento. De esta manera, se consigue la optimización de evacuación de energía y, en consecuencia, se aumenta la utilización de la red existente, el aprovechamiento de recursos renovables y se mejoran las sinergias ambientales, además de agilizarse el desarrollo de proyectos renovables y reducción de los costos para los consumidores finales.
- Real Decreto 1183/2020, de 29 de diciembre, de acceso y conexión a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica. Por su parte, el Real Decreto 1183/2020, de 29 de diciembre, establece el procedimiento para solicitar y gestionar las condiciones de acceso y conexión destinadas a la hibridación de instalaciones de generación eléctrica, incluyendo la actualización de los permisos anteriores si fuera necesario. Además, en el capítulo IV se definen los requisitos para distinguir la energía generada en instalaciones hibridas que pueda acogerse al régimen retributivo específico y los criterios que deben cumplir los nuevos módulos de generación eléctrica que se añadan a las instalaciones ya existentes, así como mecanismos de retribución. Uno de los criterios a cumplir es que la potencia instalada de la tecnología que tiene otorgados los permisos de acceso y de conexión no sea inferior al 40 % de la capacidad de acceso otorgada en el permiso de acceso.

En este mismo capítulo se especifica de conformidad de acuerdo con el aparato 12 del artículo 33 de la Ley 24/2013 que se permite a los titulares de instalaciones hibridar, ya sea con una fuente de energía renovable o almacenamiento y con permisos de acceso y conexión vigentes, evacuar la energía utilizando el mismo punto de conexión y capacidad de acceso concedida previamente.

Otro de los aspectos que se detallan en el RD 1183/2020 es que las instalaciones de producción híbridas deben proporcionar al operador del sistema la información en tiempo real tanto para la instalación en su totalidad como desagregada para cada módulo de generación. Esto incluye, en caso necesario, también la información de las instalaciones de almacenamiento.

El régimen retributivo específico regulado en el RD 113/2020 solo será aplicable a las instalaciones híbridas incluidas en uno de los siguientes tipos:

  - Hibridación de tipo 1: combinaban combustibles con origen en la biomasa.
  - Hibridación de tipo 2: instalaciones que hibridaban termosolar con biomas.
  - Hibridación tipo 3: instalaciones con derecho a la percepción del régimen retributivo específico a la que se incorpore una tecnología renovable de las definidas en los grupos y subgrupos de la categoría b) del artículo 2.

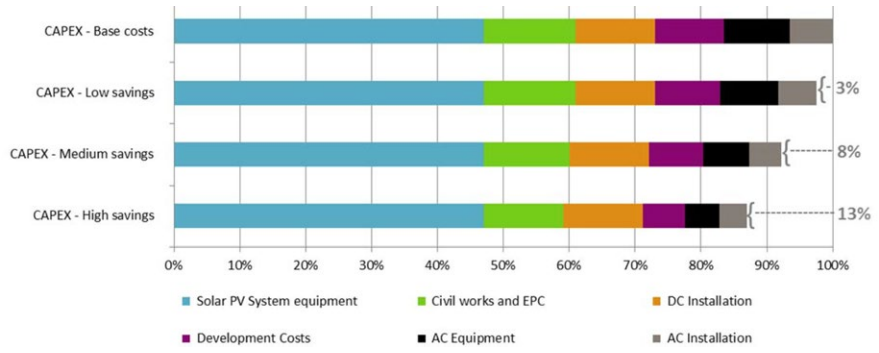

Figura 1. Estimación del ahorro total de CAPEX que puede obtenerse mediante la integración de un parque solar en un parque eólico existente (ARENA, 2016).

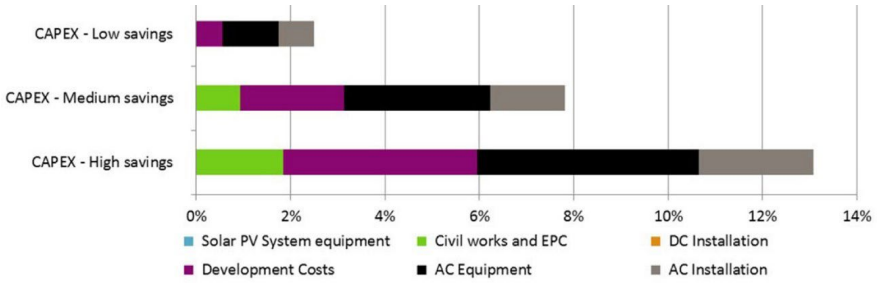

Figura 2. Estimación del ahorro de CAPEX mediante la integración de un parque solar en un parque eólico existente (ARENA, 2016).

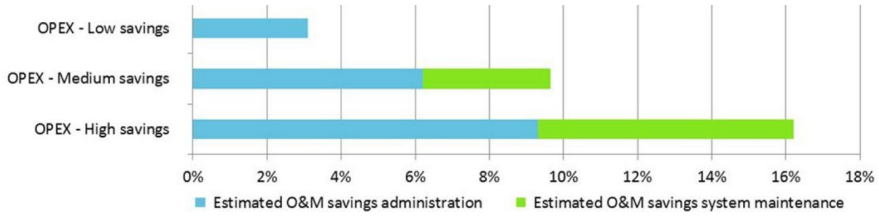

Figura 3. Estimación del ahorro total de OPEX que puede obtenerse mediante la ubicación conjunta de un parque solar en un parque eólico existente (ARENA, 2016).

Deben contar con los equipos de medida necesarios para determinar la cantidad de energía generada por cada una de ellas. Esto asegurará una adecuada retribución según los regímenes económicos que les correspondan.

En general, las regulaciones eléctricas nacionales abordan cuestiones como el acceso a la red, los procedimientos de conexión, los requisitos técnicos y las tarifas de conexión. Estas regulaciones pueden aplicarse a los proyectos de energía renovable independientes y a los sistemas híbridos que combinan diferentes tecnologías renovables.

Análisis económico

Son pocos los estudios que se han realizado para evaluar el ahorro de costes de potencial que tiene como consecuencia la hibridación de dos o más tecnologías renovables.

Actualmente, Australia es el único país que ha realizado un estudio gubernamental relativo al potencial de hibridación de la energía eólica con la fotovoltaica. El estudio exhaustivo para estimar el ahorro de costes potencial llevado a cabo por la Australian Government Energy Agency (ARENA) en 2016 analiza las diversas posibilidades de hibridar ambas tecnologías, y se centra, concretamente, en la instalación de plantas fotovoltaicas en parques eólicos existentes en funcionamiento.

Asimismo, hace una estimación del ahorro que supone esta instalación, tanto en costes de instalación (CAPEX) como en costes de operación y mantenimiento (OPEX).

En los gráficos de barras de las figuras 1, 2 y 3 se observan las estimaciones basadas en el desglose de costes de un parque solar fotovoltaico típico de 20-50 MW. El ahorro se calcula a partir de un parque solar fotovoltaico equivalente conectado a una subestación existente. Hay que destacar que las cifras expuestas se basan en el mercado de los costes de proyectos solares a escala comercial, que están sujetos a modificaciones en función de cada proyecto.

Se proponen varios escenarios en los va a variar el ahorro estimado. Como se puede apreciar en la figura 1, los costes de los equipos fotovoltaicos necesarios para el parque solar no cambiarán con respecto al caso base. Sin embargo, se pueden obtener ahorros importantes en la infraestructura de conexión a la red y en la instalación, así como en los costes de desarrollo, que se consiguen mediante ahorros en los costes del terreno, las aprobaciones de desarrollo y los estudios.

La figura 2 expone de manera detallada los ahorros de las partidas en las que se observan reducciones significativas en las estimaciones del CAPEX, por tanto, la conexión en corriente alterna y los equipos necesarios. Asimismo, se espera obtener ahorros parciales en los costes de gestión y desarrollo debido a la sinergia y la colaboración en el proyecto conjunto.

En el caso de los dos últimos escenarios, además, se observan reducciones en los casos de obra civil, por ejemplo, por el acondicionamiento del emplazamiento.

Por otro lado, en la figura 3 se muestra un desglose de los ahorros estimados para el periodo de explotación y mantenimiento. Se observa que la reducción de los costes de explotación y mantenimiento puede reportar ahorros adicionales a los del CAPEX. El mayor porcentaje de ahorro se encuentra en los costes de administración e información. De acuerdo con AECOM, el ahorro sería de entre el 3 % y el 16 % en costes de explotación y mantenimiento del parque solar.

A modo de conclusión de este estudio, se estima que pueden obtenerse importantes ahorros en el CAPEX entre el 3 % y el 13 %. El mayor ahorro en el CAPEX correspondería a la parte fotovoltaica de la instalación híbrida, concretamente en la obra civil, el desarrollo del proyecto y en los equipos e infraestructura de conexión

a red.

Además, también pueden obtenerse importantes ahorros en funcionamiento y mantenimiento, y se pueden generar entre el 3 % y el 16 % de ahorros en el OPEX.

Hay que destacar el análisis práctico incluido en el estudio sobre la hibridación de parques eólicos existentes australianos con nuevas instalaciones fotovoltaicas. Concluye que bastaría un límite máximo de recortes a la producción del 5 % para obtener instalaciones híbridas eólicas-FV con una potencia adicional equivalente al 25-49 % de la potencia del parque eólico.

La Asociación de Empresas de Energías Renovables (APPA Renovables, 2021) ha presentado un informe titulado Hibridación en la generación renovable. Análisis sobre el panorama actual y futuro en España, y entre otros muchos temas, todos ellos relacionados con la hibridación, también entran a evaluar el ahorro que supone la hibridación renovable. El estudio se ha basado en algunas hibridaciones brownfield que se están proyectando en España. Estas hibridaciones combinan tecnología eólica con solar y comparten un punto de conexión a la red. Este enfoque busca encontrar soluciones eficientes para aprovechar al máximo las capacidades y los recursos disponibles en el sistema energético. Para ello, se estudiaron dos proyectos híbridos que combinan energía eólica y fotovoltaica. En el proyecto 1 se integra una planta eólica de 26 MW con otra fotovoltaica de 21 MW, con pérdidas de producción del 0 % y del 5,9 %, respectivamente. Por otro lado, el proyecto 2 combina una planta eólica de 24 MW con otra fotovoltaica de 24 MW, con pérdidas de producción del 0 % y del 9,5 %, respectivamente.

En la tabla 1 se recogen los ahorros obtenidos en las partidas del CAPEX y OPEX para cada uno de los proyectos.

Por tanto, los ahorros se logran en diversas áreas, como en las infraestructuras de conexión a la red, lo que implica una reducción de los costes de infraestructura y, por consiguiente, en la partida de obra civil. Cabe destacar que no se obtiene ahorros en la instalación del parque híbrido renovable, es decir, en los equipos empleados para la constitución de la planta. La

		Proyecto 1	Proyecto 2
CAPEX	Ahorro en costes de desarrollo, autorizaciones y servicios	20-30 %	20-30 %
	Ahorro en infraestructuras eléctricas	70-80 %	50 %
	Ahorro en conexión a la red	85 %	90 %
OPEX	Ahorro en operación	25 %	20 %
	Ahorro en mantenimiento	10 %	10 %

Tabla 1. Ahorros por línea de coste (APPA Renovables, 2021)

compartición de instalaciones entre la parte eólica y la parte solar también supone ahorros adicionales en los gastos de infraestructura.

En la hibridación se asume, como mínimo, que comparten la misma conexión a la red y la misma subestación, lo que conlleva un mismo coste de interconexión. Por ello, se puede observar que los mayores ahorros se obtienen en estas partidas del CAPEX.

Asimismo, se optimizan los gastos relacionados con la operación y el mantenimiento de las instalaciones, y también se obtienen beneficios en los costes asociados al desarrollo del negocio. Los gastos de explotación y de mantenimiento serán más bajos en el caso del parque híbrido, dado que ambas plantas están ubicadas en un único emplazamiento o en proximidad cercana.

A efectos globales, y teniendo en consideración el peso de cada uno de los conceptos sobre el CAPEX, el ahorro que se alcanza hibridando ambas instalaciones se sitúa en torno al 10-12 %, mientras que los ahorros en los OPEX oscilan entre el 10 % y el 15 %.

Estos resultados muestran cómo la hibridación puede contribuir de manera significativa a mejorar la eficiencia económica y el rendimiento de los proyectos de energías renovables.

Además, comparando los resultados de estudios expuestos se puede apreciar que en ambos casos los ahorros se encuentran identificados en la obra civil, en la infraestructura a red eléctrica y en los costes de operación y mantenimiento.

Al adentrarse en los sectores en los que se logra el ahorro, es importante mencionar que el diseño eficiente desempeña un papel crucial al reducir los costes de inversión. Como ya se ha demostrado en los estudios anteriores, estas eficiencias se pueden obtener mediante sinergias generadas y la utilización de instalaciones preexistentes. La magnitud de estos ahorros estará determinada por los requisitos técnicos establecidos por las autoridades y los organismos relevantes. Estos requisitos técnicos tienen un impacto significativo en los costes de administración, el establecimiento de puntos de acceso, las conexiones entre distintas plantas o unidades de producción y en la implementación de los sistemas de medición necesarios para el funcionamiento adecuado del proyecto.

La posibilidad de compartir los costos a lo largo de la vida útil de los activos entre dos parques ubicados en la misma área ofrece la oportunidad de disminuir el coste anual por MW instalado en el mantenimiento de ambas plantas. Esto es posible gracias a la integración de las instalaciones, lo que optimiza la eficiencia operativa y reduce los gastos asociados al mantenimiento y funcionamiento de ambas instalaciones.

Asimismo, al contar con varias tecnologías en un mismo punto de conexión a la red, es posible aplicar una estrategia conjunta en la operación diaria de los mercados, lo que se traduce en una mayor eficiencia en las previsiones de producción y en la reducción de desvíos en la generación de energía. Esta integración permite optimizar la gestión de los recursos disponibles y maximizar el aprovechamiento de las condiciones cambiantes del mercado, contribuyendo así a una operación más eficiente y sostenible.

Cuando se dispone de dos tecnologías con diferentes curvas de generación, un parque híbrido puede aumentar la cantidad total de MWh vendidos en comparación con el uso

de una sola tecnología. A pesar de que dos parques que operan de manera independiente podrían tener una mayor capacidad de evacuación, en un parque híbrido una gestión adecuada del vertido puede permitir que la instalación híbrida sea más rentable. Esto es posible cuando se encuentra el equilibrio entre la optimización de costos y la capacidad de generar ingresos. De este modo se aprovecha al máximo la generación combinada de ambas tecnologías y se obtiene una mayor eficiencia en la producción y venta de energía.

El aumento en la producción de energía se basa en el incremento de las horas equivalentes de operación de la instalación híbrida, lo que optimiza el aprovechamiento de la capacidad del punto de conexión y permite dimensionar adecuadamente las instalaciones para maximizar el retorno y minimizar la energía desechada debido a la incapacidad de evacuarla simultáneamente.

Además, este tipo de parques tienen la posibilidad de participar en mercados de servicios complementarios, como el mercado de regulación de secundaria, el mercado de capacidad y el nuevo mercado de activación de energías de equilibrio. El acceso a estos mercados estará sujeto a modificaciones regulatorias que puedan surgir, lo que aumentará la capacidad de generar ingresos para estas tecnologías híbridas. Al diversificar sus fuentes de ingresos, los parques híbridos se vuelven más resilientes y pueden aprovechar oportunidades adicionales para optimizar su rentabilidad y contribuir aún más al desarrollo sostenible de la energía renovable.

A pesar de que la publicación del Real Decreto 1183/2020 ha aclarado la viabilidad de la hibridación de plantas, siempre que cuenten con los equipos de medida necesarios para determinar la energía generada por cada tecnología, es importante considerar que el término de retribución a la operación podría verse afectado. Esto se debe a que la hibridación puede reducir las horas equivalentes en favor de la energía generada por la tecnología incorporada, lo que puede tener un impacto en la remuneración recibida por el proyecto. No obstante, el reconocimiento y la adecuación de los marcos regulatorios y de retribución a estos escenarios híbridos serán fundamentales para incentivar la implementación y el desarrollo óptimo de estos sistemas combinados de generación de energía renovable.

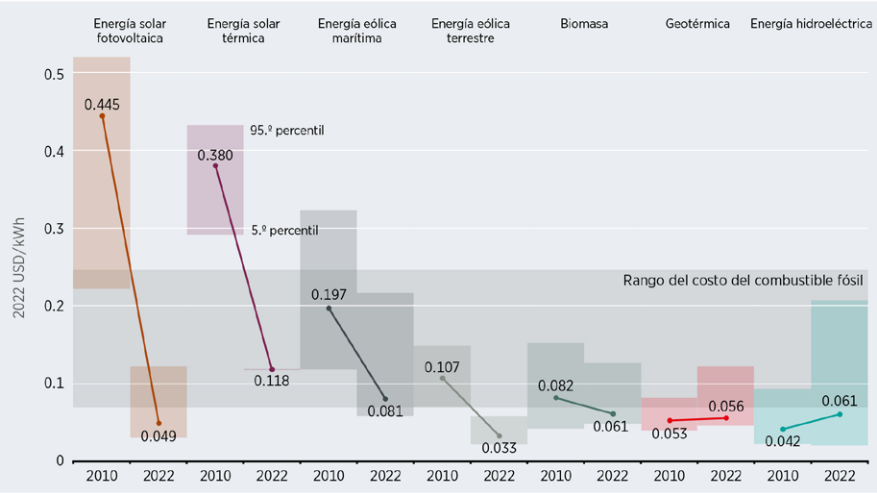

Figura 4. Costes totales de instalación, factor de capacidad y LCOE de las nuevas instalaciones fotovoltaicas y eólicas terrestres y marinas, 2010-2022 (IRENA, 2023).

Otro punto importante que destacar es el coste de los paneles fotovoltaicos, que está en constante decaimiento y esto se ve reflejado en el coste total de la instalación. En la figura 4 se puede observar cómo el coste total de la inversión de la energía solar fotovoltaica ha tenido una tendencia a la baja constante y casi lineal, pues ha disminuido de 0,445 USD/kWh en 2010 a 0,049 USD/kWh en 2022, es decir el 89 %. El coste de inversión de la energía eólica terrestre y marina también ha disminuido, pero no tan significativamente. Esto se ve reflejado en el costo medio ponderado mundial de la electricidad (LCOE) generada por nuevas instalaciones solares fotovoltaicas y proyectos eólicos terrestres y marinos, que también ha disminuido (APPA Renovables, 2021). Entre 2010 y 2022, el LCOE medio ponderado mundial de nuevos proyectos solares fotovoltaicos a escala de distribución se redujo en el 89 %, mientras que la energía eólica terrestre y la eólica marina experimentaron reducciones del 68 % y del 60 %, respectivamente. Estos resultados demuestran la creciente viabilidad y competitividad de las energías renovables en comparación con las alternativas no renovables.

Además, se produjeron mejoras significativas en el rendimiento, especialmente en la energía eólica terrestre, lo que incrementó los factores de capacidad. En el caso del factor de capacidad de las instalaciones solares, ya se consigue un rendimiento del 20 %.

Se ha llevado a cabo un estudio con el propósito de calcular el ahorro generado por la hibridación de ciertos proyectos que han comenzado su proceso en el Ministerio para la Transición Ecológica de España con el fin de compararlo con los estudios previamente mencionados. Los proyectos sujetos al análisis son los siguientes:

- Reventones, planta fotovoltaica 26 MW + Reventones, parque eólico 34 MW (Murcia).
- Almendros II, fotovoltaica 32 MW+ Almendros II, eólico 28 MW (Murcia).
- Valdefuentes, fotovoltaica 27,8 MW + Parque Eólico Valdefuentes 28 MW (Huelva).

Para realizar la estimación del ahorro en el CAPEX de las instalaciones, se consideraron costes de inversión de 1.673 €/kW para la energía eólica y 900 €/kW en el caso de fotovoltaica. Utilizando esta información y teniendo en cuenta la potencia de cada instalación, se calculó la inversión necesaria si se llevara a cabo el desarrollo de las instalaciones de manera independiente. Posteriormente, se compararon estos cálculos con los presupuestos de inversión estimados mencionados en el anuncio del Boletín Oficial del Estado (BOE) de cada uno de los proyectos de hibridación.

Para realizar una comparación precisa con el valor del presupuesto de ejecución del material proporcionado

por el BOE con la estimación basada en los datos de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), fue necesario agregar el 20 % de los costos de conexión a la red asociados al proyecto. Es importante destacar que, de cada proyecto, el BOE proporciona el valor del presupuesto de ejecución del material, sin incluir el 13 % de los gastos generales y el 6 % de beneficio industrial.

Los resultados del ahorro en el CAPEX al combinar las instalaciones solares fotovoltaicas y eólicas en los proyectos de estudio se presentan en la tabla 2. Se observa que el ahorro varía entre el 16 % y el 20 %, lo que representa un porcentaje ligeramente superior en comparación con los estudios previamente mencionados.

Además, si se llegase a condicionar la prioridad de acceso para las energías renovables a la igualdad de condiciones en el mercado, aún sería más importante reducir el coste de producción por megavatio-hora de los procesos de generación con energías renovables a través de la hibridación (Balbás, 2016).

Por consiguiente, diversos estudios respaldan la conclusión de que la hibridación de fuentes de energía renovable, como la solar fotovoltaica y la eólica, supondrá ahorros de, aproximadamente, el 9 % al 15 % en los costos de inversión (CAPEX) y del 10 % al 15 % en los costos operativos (OPEX).

Costes de instalación IRENA 2021 (€/kW)					
Eólica	1.673				
Fotovoltaica	900				
Datos BOE					
		Potencia (MW)		**Financiación (M€)**	
Proyecto	**FV**	**Eólica**	**Hibridación**	**Presupuesto de ejecución material**	**Presupuesto de ejecución material+coste de conexión***
REVENTONES	34	26	60	15,80	19
ALMENDROS	28	32	60	14,60	17,50
VALDEFUENTES	28	27,80	55,80	15,50	18,60
*Los costes de conexión eléctrica están en el 15-20% del presupuesto de ejecución material					
IRENA 2021					
Proyecto	**Coste del proyecto (€/kW)**	**Presupuesto (M€)**	**Ahorro (%)**		
REVENTONES	1338	16,10	18		
ALMENDROS	1261	15,10	16		
VALDEFUENTES	1288	15,50	20		

Proyecto	Ahorro CAPEX
Reventones	18 %
Almendros	16 %
Valdefuentes	20 %

Tabla 2. Ahorro producido en el CAPEX de varios proyectos híbridos

PATENTES

La patente ES2859732T3 describe un método para direccionar la energía desde un sistema híbrido de energía eólica-solar hacia una red eléctrica. Los paneles fotovoltaicos generan energía en corriente continua al estar expuestos a la luz solar. Para acoplar esta energía a la red eléctrica, se emplea un inversor que transforma la salida de corriente continua de los paneles fotovoltaicos en una señal de corriente alterna adecuada para su conexión a la red.

Por otro lado, las turbinas eólicas generan una salida de energía en corriente alterna. Sin embargo, la frecuencia y la fase de esta salida dependen de la velocidad de rotación y de la posición del rotor dentro del generador de la turbina. Por ende, la energía de corriente alterna producida por el sistema de energía eólica se rectifica habitualmente para obtener una señal de energía de corriente continua intermedia.

Cada inversor representa un costo adicional para el sistema de energía en términos de gastos de componentes, pérdida de potencia y complejidad. Por ende, se requieren sistemas y métodos que permitan convertir la energía proveniente de fuentes eólicas y solares de manera que pueda ser fácilmente integrada en la red eléctrica, al tiempo que se reduzca el número de componentes y los costes asociados a los inversores redundantes.

Mediante el procedimiento descrito en esta patente, es posible reducir el número de inversores necesarios para transformar la energía generada por la fuente en una forma adecuada para ser vertida a la red eléctrica.

El procedimiento consiste en recibir dos señales de energía de corriente continua como entrada y también recibir una o más señales de control desde la red eléctrica. Luego, en función de, al menos, alguna de estas señales de control, se dirigen algunas de las señales de energía de corriente continua de entrada para formar una señal de energía de corriente continua de salida. Finalmente, esta señal de energía de corriente continua de salida se transforma en una señal de energía de corriente alterna de salida, lista para ser transmitida a través de la red eléctrica.

El sistema puede contar con inversores de corriente alterna a corriente continua para transformar las señales de energía de corriente alterna provenientes de la energía eólica en, al menos, una señal de energía de corriente continua derivada.

Adicionalmente, se suministra un controlador encargado de direccionar la energía desde las fuentes de energía hacia la red eléctrica. El controlador cuenta con entradas para recibir se-

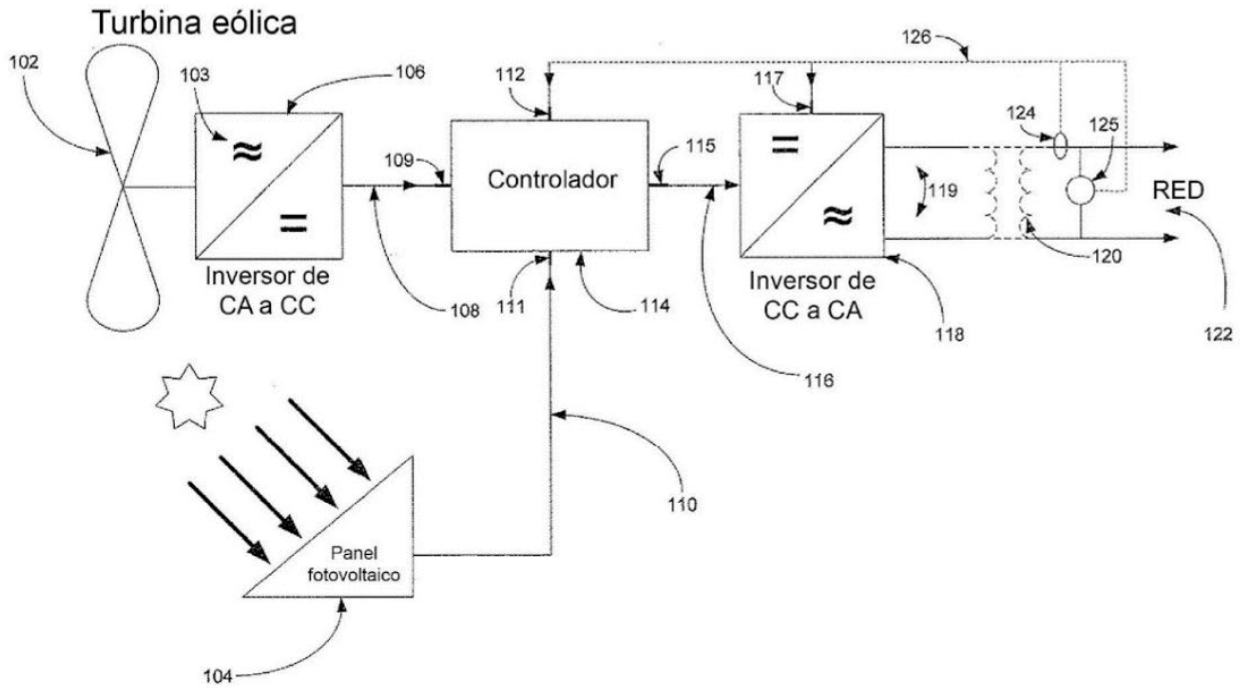

Figura 5. Diagrama de conexión a red eléctrica de un sistema eólico-fotovoltaico híbrido. (ES2859732T3). CA: corriente alterna; CC: corriente continua.

ñales de energía de corriente continua provenientes de ambas fuentes de energía (eólica y solar fotovoltaica). Además, el controlador dispone de una entrada para recibir señales de control procedentes de la red eléctrica.

Según el procedimiento establecido en la patente, un controlador es capaz de supervisar y dirigir la energía rectificada proveniente de una o más turbinas, así como la energía de corriente continua generada por uno o más paneles fotovoltaicos hacia una única salida de corriente continua compartida. Posteriormente, esta salida de corriente continua común se puede convertir (a corriente alterna) para ser inyectada en la red eléctrica.

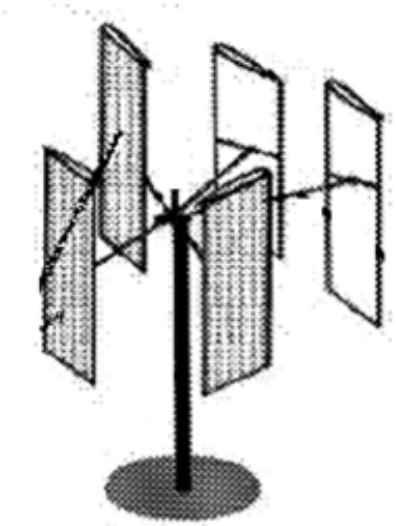

Figura 6. Esquema del sistema de turbina híbrida eólica-fotovoltaica (US2018372073A1).

Mediante el uso de un controlador de entrada de corriente continua múltiple con una salida de corriente continua compartida, es posible reducir significativamente el número de inversores de salida, como se puede apreciar en la figura 5, que representa un diagrama del sistema de inyección a la red eléctrica. Esta solución permite mayor eficiencia y simplificación del sistema al minimizar el uso de inversores y, a su vez, facilita la integración de la energía generada desde diferentes fuentes renovables en la red eléctrica.

La patente US2018372073A1 detalla un sistema de turbina híbrida eólica-fotovoltaica que incluye módulos fotovoltaicos incorporados en las palas de una turbina eólica de eje vertical con el propósito de generar energía. Este enfoque permite utilizar la energía del viento y la radiación solar con un solo dispositivo para producir energía eléctrica renovable de manera continua y sostenible.

Como se puede observar en el esquema que se presenta en la figura 6, los paneles fotovoltaicos son de película delgada y flexible y están integrados en las palas de una turbina eólica de eje vertical tipo “H”. Esta turbina está compuesta por cinco palas igualmente espaciadas a intervalos de 72 grados. Los paneles fotovoltaicos empleados en este dispositivo son ligeros, flexibles y tienen la capacidad de doblarse hasta 30 grados para ajustarse a la curvatura de las palas.

El sistema está equipado con un controlador de carga híbrido que se encuentra conectado a dos baterías de 12 V. Este controlador de carga híbrido supervisa y combina las energías de corriente continua y corriente alterna generadas por los módulos fotovoltaicos y el aerogenerador, respectivamente, para almacenar con posterioridad la energía resultante en las baterías.

Este sistema de turbina híbrida fotovoltaica aborda las limitaciones que enfrentan los sistemas fotovoltaicos convencionales en términos de mantenimiento y operatividad. Uno de estos desafíos es el aumento de la temperatura de los paneles fotovoltaicos debido a la radiación solar que no se convierte en electricidad, lo que implica una disminución de la eficiencia eléctrica general. Sin embargo, este problema se atenúa en el presente sistema cuando las palas de la turbina entran en movimiento, ya que el calor generado se disipa más rápidamente hacia el entorno circundante, por lo que se reduce la temperatura de los paneles y mejora su rendimiento.

Otra de las ventajas a destacar del sistema de turbina híbrida fotovoltaica-eólica propuesto en esta patente es que, al integrar dos tecnologías de generación de energía renovable en un solo dispositivo, se reduce el terreno requerido para la instalación del proyecto. En otras palabras, en el mismo espacio se puede generar mayor cantidad de energía, es decir, una instalación de mayor potencia.

Las diversas láminas del sistema redirigen una porción de la luz solar incidente hacia otros paneles fotovoltaicos. De este modo, se genera un incremento en la corriente de salida de estos paneles y, por ende, un aumento en el rendimiento. Este enfoque permite prescindir de la necesidad de utilizar un seguidor solar.

También la patente US10514001B2 describe un sistema híbrido de turbina híbrida eólica-fotovoltaica que se representa en la figura 7.

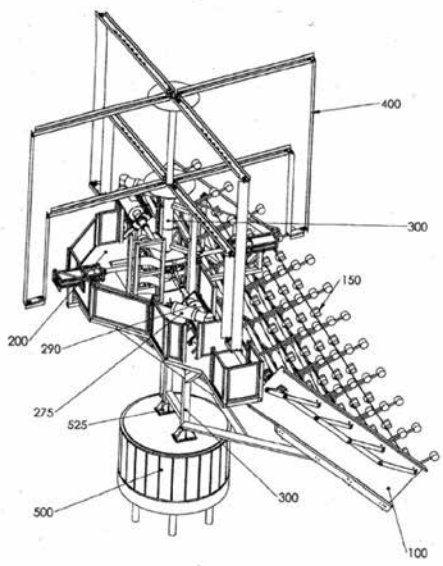

Figura 7. Vista en perspectiva que muestra un molino de viento de eje vertical colocado sobre un conjunto con colectores de espejo solar concentradores circulares y que usa un motor térmico para impulsar un eje de salida (US10514001B2).

La matriz de captación solar 100 está soportada estructuralmente por el mástil principal y el marco de montaje 300. La energía solar concentrada se redirige a los compartimentos de almacenamiento motor térmico 290,290', que actúan como fuentes de calor para el calor del motor 250, montados en el montaje de plataforma de mantenimiento principal 200. La eficiencia del motor térmico aumenta 30 significativamente con los regeneradores 275,275' incorporados en el diseño del motor térmico.

El mástil principal y bastidor de montaje 300 también proporciona un soporte estructural para la turbina de viento de eje vertical de montaje (molino de viento brazo y la cuchilla de montaje) 400. El molino de viento brazo y cuchilla de montaje gira en el principal eje de transmisión vertical 600. El momento estructural y apoyo axial del 35 conjunto de mástil y marco principal es proporcionado por la placa de base del rotador 525. El eje vertical o control de acimut para todo el conjunto es proporcionado por el conjunto de rotador de base 500 que soporta la placa de base del rotador 525.

La electricidad se produce a partir de una inducción eléctrica del generador 205 accionado tanto por el motor térmico 250 como por la turbina eólica 400. De esta manera, el sistema de generación eléctrica según US10514001B2 comprende un motor térmico (250); un conjunto de recolección de energía solar (100); una turbina eólica de eje vertical (400) que comprende una serie de palas de molino de viento vertical (400) desplazadas lateralmente desde y giratorias alrededor de un eje central, y medios de generación de electricidad (205).

El conjunto de recolección de energía solar (100) comprende un conjunto de espejos parabólicos 10 (116) dispuestos para recolectar y transmitir energía solar al motor térmico (250). La turbina eólica de eje vertical (400) está montada sobre el conjunto de recolección de energía solar (100). De esta manera, el eje de transmisión de salida común (600) está situado en el mismo eje que el eje central del aerogenerador de eje vertical (400), y está conectado para ser accionado por dicho aerogenerador de eje vertical (400) y dicho motor térmico (250); con lo cual, los medios de generación de electricidad (205) están conectados aleje de transmisión de salida común (600) para producir electricidad.

VENTAJAS DE LA HIBRIDACIÓN SOLAR Y EÓLICA

La hibridación de solar con eólica presenta las siguientes ventajas:

- Reducción de la inversión en infraestructuras de red eléctrica: al compartir nodo eléctrico ambas instalaciones, se evita la construcción de nuevas líneas eléctricas y subestaciones, lo que implica también menor impacto medioambiental.
- Incremento del factor de capacidad en el punto de acceso: las diferentes curvas de carga de cada una de las tecnologías complementarias suponen un aumento del factor de capacidad de la planta, que se traduce en un mayor número de horas inyectando electricidad. Habrá horas en las que no haya radiación solar, pero en las que sí sople el viento, lo cual contribuye a la estabilidad de la red eléctrica al reducir picos de producción.
- Optimización del mantenimiento, las inversiones y la formación del personal: la reducción de infraestructura conlleva una menor inversión de CAPEX y, en consecuencia, menos costes de mantenimiento, con lo que el ahorro de OPEX también es significativo. Además, el personal encargado del mantenimiento en un proyecto puede ser formado para también llevar a cabo tareas para la otra tecnología, fomentando así la empleabilidad y el desarrollo del personal.

CONCLUSIONES

Para concluir, este trabajo ha resaltado las notables ventajas proporcionadas por las tecnologías híbridas de energía renovable. A lo largo de esta investigación, se han abordado diversos aspectos relacionados con la combinación de diferentes fuentes de energía renovable.

En lo que respecta al marco le-

gal de las instalaciones híbridas, se requiere un desarrollo que brinde mayor flexibilidad para que las tecnologías de fuentes renovables puedan integrarse. De esta manera, pueden reconocer y clarificar aún más las posibles alternativas de hibridación, así como la hibridación con instalaciones de almacenamiento. Además, es necesario seguir agilizando y simplificando la tramitación administrativa en aquellas instalaciones ya existentes que deseen ampliarse en régimen de hibridación de diferentes tecnologías.

En el contexto estatal, es necesario modificar el marco regulatorio para ofrecer más oportunidades a las instalaciones que buscan expandir su capacidad. Para ello, una solución podría ser mediante incentivos y la habilitación de la instalación de sistemas de almacenamiento, lo que proporcionaría mayor flexibilidad a la red eléctrica.

Del mismo modo, es necesario elaborar el marco legal para este tipo de instalaciones en los procesos operativos, con el propósito de evitar restricciones o impedimentos para aquellas instalaciones que deseen participar en estos sistemas y opten por agregar un nuevo módulo de generación.

De acuerdo con las diferentes modalidades de hibridación, una amplia variedad de tecnologías es compatibles entre sí, lo que genera resultados positivos en términos de optimización de la producción de energía. Entre todas estas combinaciones, destaca especialmente la elevada compatibilidad observada en las plantas de energía solar fotovoltaica y las de energía eólica. Por esta razón, en el análisis de la literatura científica, la mayoría de los proyectos identificados son aquellos en los que se combina, precisamente, estas dos fuentes de energía renovable o adicionalmente con sistemas de almacenamiento.

En cuanto al análisis económico llevado a cabo para evaluar el beneficio financiero que ofrecen este tipo de proyectos, se puede afirmar que la combinación de fuentes de energía renovable, como la solar fotovoltaica y la eólica, se traducirá en un ahorro de, aproximadamente, del 9 % al 15 % en los gastos de inversión (CAPEX) y del 10 % al 15 % en los gastos operativos (OPEX). Es importante destacar que este ahorro puede aumentar significativamente gracias a las patentes mencionadas en este trabajo. La patente ES2859732T3, por su parte, proporciona ahorros en la partida de equipos e infraestructura en el CAPEX, ya que detalla un método para dirigir la energía generada por un sistema híbrido de energía eólica-solar hacia una red eléctrica. Por otro lado, las patentes US2018372073A1 y US10514001B2, que describen sistemas de turbina híbrida eólica-fotovoltaica, ofrecen la posibilidad de reducir los costes relacionados con la obra civil y el alquiler de terrenos, dado que se requiere un espacio menor para la instalación del proyecto.

En resumen, la opción de la hibridación se presenta como una estrategia esencial para abordar de manera efectiva la crisis energética actual, proporcionando una solución sostenible y respetuosa con el entorno natural. Esta apuesta por la hibridación no solo ofrece una respuesta a los desafíos energéticos del presente, sino que también contribuye de manera significativa a la preservación del medio ambiente y optimiza el proceso de producción, además de generar ahorros económicos.

BIBLIOGRAFÍA

Australian Government Energy Agency (ARENA). AECOM Australia Pty Ltd; 15.03.2016. Disponible en: https://arena.gov.au/assets/2016/03/AECOM-Wind-solar-Co-location-Study-1.pdf.

APPA Renovables. Hibridación en la generación renovable. Análisis sobre el panorama actual y futuro en España. Everis; 2021.

Balbás García Francisco Javier. Perspectivas y posibles escenarios de las renovables en el sistema eléctrico español. Técnica Industrial. 2016; 313:70-76.

Directiva (UE) 2019/944 del Parlamento Europeo y del Consejo de 5 de junio de 2019 sobre normas comunes para el mercado interior de la electricidad y por la que se modifica la Directiva 2012/27/UE (versión refundida). Publicada en el Diario Oficial de la Unión Europea del 14 de junio de 2019.

EDP. Blog de la energía. Disponible en: https://www.edpenergia.es/es/blog/.

ES2859732T3: Inversores eólicos-solares híbridos. López Miguel Bartolomé. General Electric Company; 2020.

IRENA (2023). Costos de generación de energías renovables en 2022. Agencia Internacional de Energías Renovables; Abu Dabi.

Real Decreto Ley 23/2020, de 23 de junio, por el que se aprueban medidas en materia de energía y en otros ámbitos para la reactivación económica. Publicado en: BOE núm. 175, de 24 de junio de 2020. Departamento: Jefatura del Estado. Referencia: BOE-A-2020-6621.

Real Decreto 1183/2020, de 29 de diciembre, de acceso y conexión a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica. Publicado en: BOE núm. 340, de 30 de diciembre de 2020. Departamento: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Referencia: BOE-A-2020-17278.

Reglamento (UE) 2019/943 del Parlamento Europeo y del Consejo de 5 de junio de 2019 relativo al mercado interior de la electricidad (versión refundida). Publicado en el Diario Oficial de la Unión Europea del 14 de junio de 2019.

US10514001B2: Combined wind and solar power generating system. Armstrong Ross D, 2015. Solar Wind Reliance Initiatives SWRI LTD.

US2018372073A1: Photovoltaic-wind hybrid turbine system. Anas IQ. Al Trabsheh, Muhammad Abdul Majeed Hareb, Mahmoud Raouf Kahla. Abu Dhabi University; 2018.

Bases de datos de patentes

Bases de datos de la Oficina Japonesa de Patentes (JPO). Disponible en: www.jpo.go.jp.

Bases de datos y sitio de la Oficina Estadounidense de Patentes y Marcas (USPTO). Disponible en: www.uspto.gov.

Bases de datos y sitio web de la Oficina Española de Patentes y Marcas (OEPM). Disponible en: www.oepm.es.

Bases de datos y sitio web de la Oficina Europea de Patentes (EPO). Disponible en: www.epo.org.