

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

La generación actual de energía, basada en progresivo agotamiento de los recursos fósiles, fundamentalmente en el carbón, el gas y la energía nuclear está conduciendo a una situación insostenible a largo plazo que acelera el calentamiento global, debido a la emisión de gases de efecto invernadero, a la par que estimula una carrera en la que el progresivo agotamiento de los recursos fósiles provoca la subida de precios hasta valores impensables hace muy pocos años.

Sin embargo, con el fin de cumplir con los objetivos globales de reducción de dióxido de carbono, las plantas de generación eléctrica a partir de fuentes de energía renovables están alcanzando una rápida expansión. La generación mundial de electricidad basada en recursos renovables, sobre todo hidráulica y eólica, se espera que pase del 18% en 2006 al 23% en 2030. La Agencia Internacional de la energía (International Energy Agency - IEA) prevé que, alrededor de 2015, las energías renovables alcanzarán al gas para convertirse en la segunda fuente en importancia para la producción de energía eléctrica, por detrás del carbón [1].

La creciente penetración en los mercados eléctricos de los productores con energía renovable supone, por otra parte, tener que hacer frente a importantes retos en muchos aspectos técnicos, incluyendo la calidad de suministro, la fiabilidad y seguridad, así como otros aspectos no estrictamente técnicos. Estos desafíos están relacionados, principalmente, con la naturaleza fluctuante o variable de las energías renovables, por un lado y, por otro, con la configuración de los propios sistemas de generación utilizados en las plantas de generación renovables actuales.

Una de las principales diferencias entre las instalaciones generadoras convencionales y las renovables, dependientes de las condiciones ambientales (ya sean solares, que dependen de la irradiación solar, eólicas, dependientes de la velocidad del viento, u otras), reside en su capacidad de funcionamiento conforme a una programación temporal preestablecida por el gestor o programador de la planta. En el caso de las plantas basadas en recursos renovables no se tiene control sobre el recurso (viento), que es la fuente primaria de energía, lo que obliga a utilizar el recurso energético primario, en cuanto a cantidad y momento, tal como se presenta en la naturaleza. Es decir, la potencia generada y el momento en que se produce no son controlables, ya que no obedecen a la decisión del programador. Pero sí son predecibles, sobre todo en el corto plazo, lo que confiere a estos recursos un cierto grado de “programación pasiva”: programación que, en realidad, se basa en la previsión. Por tanto, a diferencia de las plantas convencionales, basadas en recurso fósiles, en las que la generación se hace a demanda del gestor o programador de la planta (generación a demanda), en las renovables, la generación se hace cuando el recurso primario está disponible, por lo que puede hablarse de generación dependiente del recurso (de la disponibilidad, presencia o existencia del recurso primario).

Por otra parte, los nuevos equipos de generación renovable que se integran a la red eléctrica (total o parcialmente) a través de una interfase basada en convertidores electrónicos de potencia tienen un comportamiento que difiere significativamente de los generadores convencionales (alternadores), sobre todo en términos de su impacto sobre la estabilidad electromecánica del sistema. La inercia de las máquinas síncronas utilizadas como generadores en las plantas de generación convencionales sigue jugando un papel importante en los actuales sistemas de potencia, contribuyendo de forma natural a la estabilización pasiva de la frecuencia de la red durante una perturbación transitoria. En el terreno de las renovables, la contribución de la inercia de las turbinas eólicas (basadas en generadores de inducción o síncronos) a la estabilidad intrínseca de frecuencia del sistema de potencia, es mucho menor que la de los grandes generadores síncronos convencionales.

El negocio de la energía eléctrica se fundamenta, físicamente, en el sistema de generación, transporte, distribución y uso de la energía eléctrica, como ya se ha indicado. Este sistema eléctrico de potencia, desde sus más remotos inicios hasta la actualidad, prácticamente no dispone de casi ninguna capacidad almacenamiento.

En la actualidad, la potencia total instalada de los dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica en el mundo es de 125 GW [2], aproximadamente, el 97% de los cuales corresponden a instalaciones de bombeo hidráulico, seguido de las instalaciones de aire comprimido, con 400 MW instalados. La potencia de almacenamiento total instalada representa, aproximadamente, el 3% de los 3.9 TW de potencia de generación total instalada en el mundo.

Para poner este dato en perspectiva puede compararse con los cálculos de algunos investigadores que han estimado que sería necesario un 8% de potencia de almacenamiento únicamente para el recorte de los picos de demanda. Esto sugiere que para la integración de las energías renovables dependientes de la disponibilidad del recurso (variables) sería necesario ir más allá del 8% de potencia en dispositivos de almacenamiento.

En términos generales puede decirse que el combustible fósil (el recurso energético primario) es el elemento de almacenamiento de energía del sistema eléctrico. Esta localización del elemento de almacenamiento en la entrada del sistema, hace que únicamente pueda decidirse el momento en que se genera. Es decir, únicamente permite establecer una programación temporal de la generación de energía eléctrica. Al carecer prácticamente el sistema de posibilidades de almacenamiento, los sistemas eléctricos funcionan con una limitación muy severa: el equilibrio instantáneo entre la potencia eléctrica generada y la consumida. Cuando este equilibrio se altera, aparecen desviaciones en la frecuencia del sistema (control frecuencia-potencia). La consecución física de este equilibrio no es tarea fácil, ya que involucra a centenares de plantas de generación y a millones de receptores, abarcando la extensión geográfica de todo un continente o país.

Aunque la energía eléctrica no puede almacenarse directamente (de forma económica), en grandes cantidades, puede almacenarse fácilmente en otras formas de energía y, posteriormente, convertirse de nuevo en electricidad, cuando se precise. En determinadas situaciones podría suceder que el elevado valor de la energía eléctrica durante el pico de demanda puede llegar a cubrir el coste de almacenar una cierta cantidad de la energía producida durante las horas valle.

La principal ventaja que se derivaría de la disposición de un sistema con una cierta capacidad de almacenamiento de energía sería la de permitir la integración en la red de más fuentes basadas en recursos renovables basados en la disponibilidad del recurso (variables). Pero un sistema de almacenamiento de energía ofrecería otras ventajas adicionales para los productores de renovables, para el operador del sistema y para los consumidores. De entre estas ventajas adicionales cabría destacar las siguientes:

- Beneficios para los productores de energías renovables.
- Una producción, un control de la frecuencia y una calidad de onda más estables de la energía eléctrica procedente de las fuentes renovables
- Reducción de la capacidad de conexión y de transmisión necesarias para las fuentes de energía renovables de hasta dos tercios (con un sistema de almacenamiento la capacidad de conexión en el MW puede igualar la salida media del viento o de la planta de energía solar, en lugar de sus potencias instaladas o nominales)
- La posibilidad de que los productores de renovables aprovechen las ventajas de los mercados competitivos de energía, tales como las ofertas garantizadas a un día
- Beneficios para el operador del sistema
- Flexibilidad para integrar mayores cantidades de energía eléctrica de procedencia renovable (variable) en la red, a cualquier hora del día
- Capacidad de adquirir energía a bajo coste siempre que esté disponible (arbitraje)
- Aplazamiento de la inversión en mejoras del sistema de transmisión y distribución, así como de grandes nuevas unidades (centrales) generadoras de energía
- Capacidad de proveer servicios auxiliares, incluyendo la reserva rodante, el seguimiento de la demanda, el arranque rápido y la capacidad de aumentar o disminuir rápidamente la potencia inyectada, o la reposición del servicio desde cero

- Mejora de la estabilidad en la transmisión
- Reducción de la congestión en la transmisión
- Beneficios para los consumidores
- Reducción de la facturación/cargo por tiempo de utilización
- Reducción de la facturación/cargos por consumo/demanda
- Reducción de las pérdidas derivadas de una mala calidad de onda y servicio no fiable

En la actualidad, las tecnologías de almacenamiento de energía ofrecen un amplio abanico de posibilidades para llevar a cabo una serie de funciones en los diversos niveles del negocio eléctrico. Estas potencialidades pueden agruparse en tres funciones básicas del mercado: la gestión de energía (generación), el poder de transición (transporte y distribución) y la calidad y fiabilidad del suministro de energía (consumo). Dado que el propósito del sistema de almacenamiento es el de actuar como amortiguador de choque para el sistema, en sus diferentes niveles, los efectos beneficiosos se irán acumulando a medida que se vayan implementando.

Mediante el suministro de energía cuando, donde y en la cantidad que sea necesario, el almacenamiento de energía puede conducir a un mercado con mayor capacidad de reacción. El almacenamiento permitirá:

- Reducir la necesidad de activos de transporte adicionales
- Ser el proveedor preferido de servicios auxiliares
- Proveer una mejor integración de las energías renovables en el sistema
- Apoyar un uso más eficiente de los activos de red existentes
- Mejorar la fiabilidad del suministro eléctrico
- Aumentar el rendimiento de las centrales existentes y las instalaciones de transporte y distribución
- Reducir y diferir en el tiempo las inversiones necesarias para las nuevas instalaciones o el reforzamiento de las existentes

El almacenamiento de energía puede ayudar a mejorar de la eficiencia económica y la utilización de las infraestructuras existentes al permitir el uso optimizado de los activos existentes en el negocio eléctrico y creando nuevas oportunidades, lo que incrementará la inversión del sector privado que entrará en el mercado provocando un aumento de la competencia y precios más bajos [2,3].

1.2. El sistema eléctrico español

La generación de energía eléctrica en España continúa sin crecer desde 2008, año en que se marcó el máximo y desde entonces no se ha superado en consonancia con la crisis que padece el país. Pero en ninguno de estos tres años que han pasado sin crecimiento de la demanda de energía eléctrica ha dejado de crecer la potencia instalada, fundamentalmente en ciclos combinados y energías renovables.

La Figura 1.1 muestra la evolución de la generación y de la energía demanda en España, como se ha generado más que se ha demandado, la diferencia se ha exportado a Portugal, Francia y Marruecos [5].

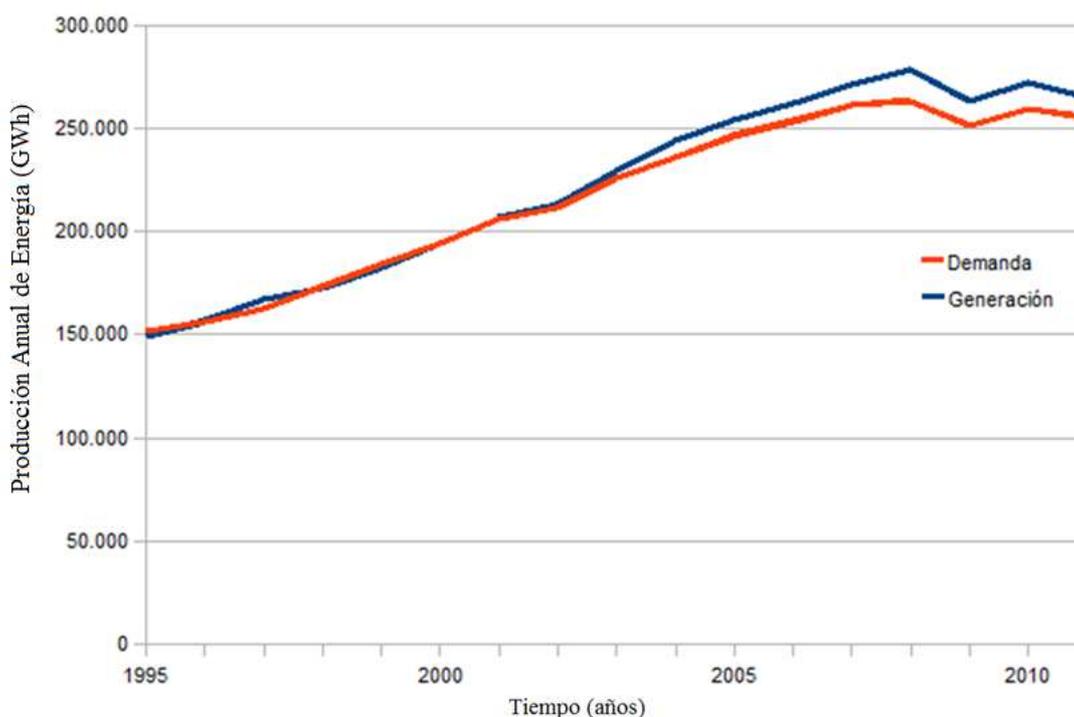


Figura 1.1. Sistema eléctrico español [5].

Como se puede observar en la Tabla 1.1, en los últimos años, el saldo de intercambios internacionales es negativo, lo que quiere decir que es exportador. La generación de energía eléctrica es mayor que la demanda de energía.

Tabla 1.1. Saldo de los intercambios internacionales físicos de energía eléctrica (GWh)

AÑO\PAÍS	Francia	Portugal	Andorra	Marruecos	Total
2007	5487	-7497	-261	-3479	-5750
2008	2889	-9439	-278	-4212	-11040
2009	1590	-4789	-299	-4588	-8086
2010	-1531	-2634	-264	-3903	-8333
2011	1189	-2492	-302	-4500	-6105

En la Figura 1.2 se muestra la distribución energética en la cobertura de la demanda, pudiéndose observar la existencia de una relación entre la cobertura de la demanda por tipos de energías y la potencia instalada de cada tipo de energía, es decir, a mayor potencia instalada de un tipo de energía, mayor aporte tiene en la cobertura de la demanda dicha energía.

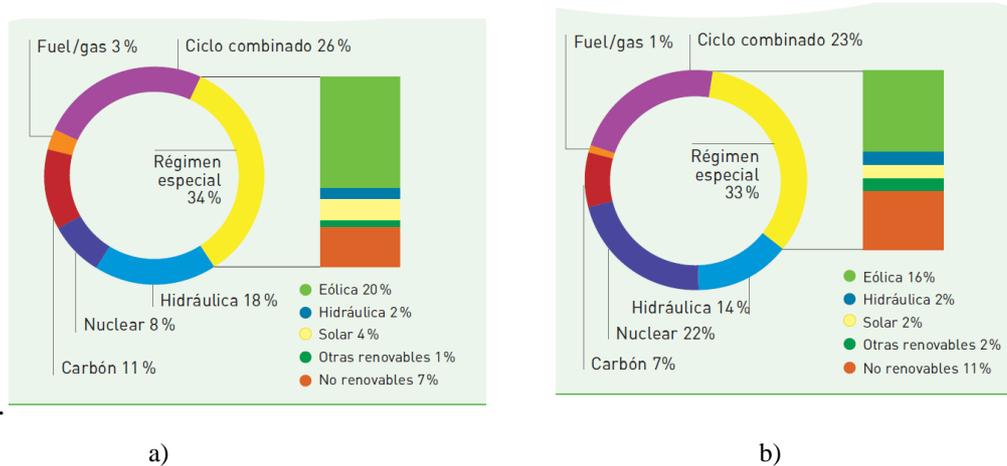


Figura 1.2. Potencia instalada en 2010 (a), Cobertura de la demanda anual (b) [5].

La evolución del último año tanto en potencia instalada como en cobertura de la demanda está representada en la Figura 1.3. En esta figura se observa el aumento en potencia instalada de energía eólica, en carbón, y otras renovables mientras se mantiene el porcentaje de energía nuclear y disminuyen el de ciclos combinados.

La mayor diferencia en la relación entre la potencia instalada y cobertura de la demanda por tipos de energía se encuentra en la energía nuclear, ya que posee centrales de gran inercia que no se pueden parar y arrancar con frecuencia, son centrales de base y que están en funcionamiento de manera constante hasta que se hace el mantenimiento.

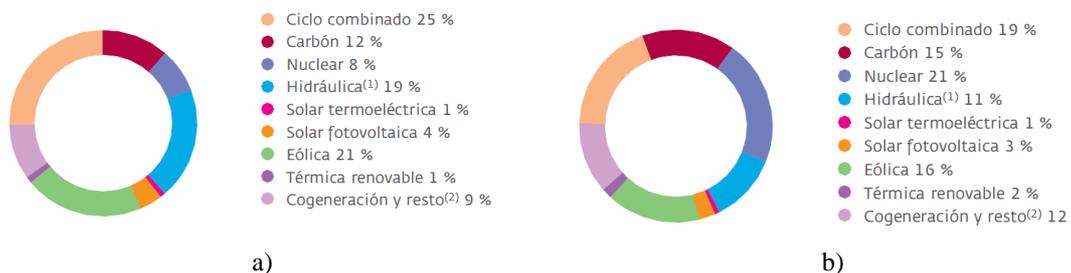


Figura 1.3. Potencia instalada en 2011 (a), Cobertura de la demanda anual 2011(b) [5].

1.3. Energías renovables

Se denomina energía renovable a la energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales. Entre las energías renovables se cuentan la eólica, la geotérmica, la hidroeléctrica, la mareomotriz, la solar, la undimotriz, la biomasa y los biocombustibles [6].

Las fuentes renovables de energía pueden dividirse en dos categorías: no contaminantes (o limpias) y contaminantes. Entre las primeras:

El viento: energía eólica.

El calor de la Tierra: energía geotérmica.

Los ríos y corrientes de agua dulce: energía hidráulica o hidroeléctrica.

Los mares, las olas y océanos: energía mareomotriz, energía undimotriz, energía mareomotérmica y energía de las corrientes.

El Sol: energía solar.

Las contaminantes se obtienen a partir de la materia orgánica o biomasa, y se pueden utilizar directamente como combustible (madera u otra materia vegetal sólida), bien convertida en bioetanol o biogás mediante procesos de fermentación orgánica o en biodiésel, mediante reacciones de transesterificación y de los residuos urbanos.

Las energías de fuentes renovables contaminantes tienen el mismo problema que la energía producida por combustibles fósiles: en la combustión emiten dióxido de carbono, gas de efecto invernadero, y a menudo son aún más contaminantes puesto que la combustión no es tan limpia, emitiendo hollines y otras partículas sólidas. Se encuadran dentro de las energías renovables porque mientras puedan cultivarse los vegetales que las producen, no se agotarán. También se consideran más limpias que sus equivalentes fósiles, porque teóricamente el dióxido de carbono emitido en la combustión ha sido previamente absorbido al transformarse en materia orgánica mediante fotosíntesis. En realidad no es equivalente la cantidad absorbida previamente con la emitida en la combustión, porque en los procesos de siembra, recolección, tratamiento y transformación, también se consume energía, con sus correspondientes emisiones.

También se puede obtener energía a partir de los residuos sólidos urbanos y de los lodos de las centrales depuradoras y potabilizadoras de agua. Energía que también es contaminante, pero que también lo sería en gran medida si no se aprovechase, pues los procesos de pudrición de la materia orgánica se realizan con emisión de gas natural y de dióxido de carbono.

➤ **Energía hidráulica**

La energía potencial acumulada en los saltos de agua puede ser transformada en energía eléctrica. Las centrales hidroeléctricas aprovechan la energía de los ríos para poner en funcionamiento unas turbinas que mueven un generador eléctrico. En España se utiliza un 15 % de esta energía para producir electricidad.

Uno de los recursos más importantes cuantitativamente en la estructura de las energías renovables es la procedente de las instalaciones hidroeléctricas; una fuente energética limpia y autóctona pero para la que se necesita construir infraestructuras necesarias que permitan aprovechar el potencial disponible con un coste nulo de combustible. El problema de este tipo de energía es que depende de las condiciones climatológicas [6].

➤ **Energía solar**

La energía solar es una fuente de vida y origen de la mayoría de las demás formas de energía en la Tierra. Recogiendo de forma adecuada la radiación solar, esta puede transformarse en otras formas de energía como energía térmica o energía eléctrica utilizando colectores solares o paneles solares según corresponda.

Mediante colectores solares, la energía solar puede transformarse en energía térmica, y utilizando paneles fotovoltaicos la energía luminosa puede transformarse en energía eléctrica. Ambos procesos nada tienen que ver entre sí en cuanto a su tecnología. Así mismo, en las centrales térmicas solares se utiliza la energía térmica de los colectores solares para generar electricidad.

Se distinguen dos componentes en la radiación solar: la radiación directa y la radiación difusa. La radiación directa es la que llega directamente del foco solar, sin reflexiones o refracciones intermedias. La difusa es la emitida por la bóveda celeste diurna gracias a los múltiples fenómenos de reflexión y refracción solar en la atmósfera, en las nubes, y el resto de elementos atmosféricos y terrestres. La radiación directa puede reflejarse y concentrarse para su utilización, mientras que no es posible concentrar la luz difusa que proviene de todas direcciones. Sin embargo, tanto la radiación directa como la radiación difusa son aprovechables.

Se puede diferenciar entre receptores activos y pasivos en que los primeros utilizan mecanismos para orientar el sistema receptor hacia el Sol y captar mejor la radiación directa.

Pero el fin eléctrico de la energía solar térmica es el de producir electricidad funcionando como una central térmica normal. Es decir, los rayos del sol bien concentrados en un punto mediante espejos o bien concentrados en el foco de espejos parabólicos calientan un fluido. El fluido llevará a estado de vapor el agua situada en la caldera haciendo girar las palas de las turbinas que están conectadas al alternador.

Por otro lado, las diferentes tecnologías fotovoltaicas se adaptan para sacar el máximo rendimiento posible de la energía que se recibe del sol convirtiéndola directamente en energía eléctrica [6].

➤ **Biomasa**

La formación de biomasa a partir de la energía solar se lleva a cabo por el proceso denominado fotosíntesis vegetal que a su vez es desencadenante de la cadena biológica. Mediante la fotosíntesis las plantas que contienen clorofila, transforman el dióxido de carbono y el agua de productos minerales sin valor energético, en materiales orgánicos con alto contenido energético y a su vez sirven de alimento a otros seres vivos. La biomasa mediante estos procesos almacena a corto plazo la energía solar en forma de carbono. La energía almacenada en el proceso fotosintético puede ser posteriormente transformada en energía térmica, eléctrica o carburantes de origen vegetal, liberando de nuevo el dióxido de carbono almacenado [6].

➤ **Energía geotérmica**

La energía geotérmica es aquella energía que puede ser obtenida mediante el aprovechamiento del calor del interior de la Tierra.

En algunas zonas del planeta, cerca de la superficie, las aguas subterráneas pueden alcanzar temperaturas de ebullición, y, por tanto, servir para accionar turbinas eléctricas o para calentar agua [6].

➤ **Energía marina**

La energía marina o energía de los mares se refiere a la energía producida por las olas del mar, las mareas, la salinidad y las diferencias de temperatura del océano. El movimiento del agua en los océanos del mundo crea un gran almacén de energía cinética. Esta energía se puede aprovechar para generar electricidad que alimente viviendas, transporte e industria. Los principales tipos son:

Energía de las olas, undimotriz.

Energía de las mareas o energía mareomotriz.

Energía de las corrientes: consiste en el aprovechamiento de la energía cinética contenida en las corrientes marinas. El proceso de captación se basa en convertidores de energía cinética similares a los aerogeneradores empleando en este caso instalaciones submarinas para corrientes de agua.

Maremotérmica: se fundamenta en el aprovechamiento de la energía térmica del mar basado en la diferencia de temperaturas entre la superficie del mar y las aguas profundas. El aprovechamiento de este tipo de energía requiere que el gradiente térmico sea de al menos 20°. Las plantas maremotérmicas transforman la energía térmica en energía eléctrica utilizando el ciclo termodinámico denominado "ciclo de Rankine" para producir energía eléctrica cuyo foco caliente es el agua de la superficie del mar y el foco frío el agua de las profundidades.

Energía osmótica: es la energía de los gradientes de salinidad [6].

➤ **Energía eólica**

La energía eólica es la obtenida de la energía cinética del viento.

La energía eólica ha venido utilizándose desde la antigüedad en molinos de viento para moler el grano, en el bombeo de agua para su extracción de pozos o en barcos de vela. Su mayor aportación en la actualidad es en la generación de energía eléctrica.

La energía eólica es convertida en eléctrica mediante unas turbinas o molinos que hacen girar un eje conectado a un generador eléctrico cuando el viento incide en sus palas.

Las energías renovables se distribuyen en España por comunidades autónomas y por tipo de energía como muestra la Tabla 1.2. Pudiendo observarse la correlación existente entre potencia instalada y energía vendida de cada tipo de energía [6].

Tabla 1.2. Distribución de la potencia instalada y la producción anual de energías renovables en España, año 2011

Comunidad	Solar		Eólica		Hidráulica		Biomasa	
	Energía vendida (GWh)	Potencia instalada (MW)						
Andalucía	1225	780	3506	2451	180	130	1021	200
Aragón	197	125	4014	1687	819	252	67	34
Asturias	0	0	553	314	246	77	357	86
Baleares	79	52	3	4	0	0	0	0
Canaria	159	96	339	142	0	0	7	1
Cantabria	2	2	29	18	241	73	18	3
C. la Mancha	1512	863	7452	3761	296	118	163	54
C. León	548	330	6886	3602	464	222	27	9
Cataluña	271	165	854	621	917	279	149	42
Ceuta y Melilla	0	0	0	0	0	0	0	0
C. Valenciana	352	224	1444	878	11	31	20	12
Extremadura	776	454	0	0	12	20	0	1
Galicia	11	9	7621	3208	1367	490	220	49
La Rioja	72	78	971	448	69	27	12	4
Madrid	33	26	0	0	10	44	189	43
Murcia	51	292	277	154	42	14	31	10
Navarra	244	124	2480	969	418	139	192	40
País Vasco	18	17	426	194	117	53	197	77
Total	6018	3635	36836	18451	5209	1969	2668	665

Hay quienes consideran que la eólica no supone una alternativa a las fuentes de energía actuales, ya que no genera energía constantemente por falta o exceso de viento. Es la intermitencia uno de sus principales inconvenientes.

En la Tabla 1.2 se pueden observar los valores por comunidades autónomas y por tipo de energía renovable existentes tanto en potencia instalada como en energía producida. Extrayéndose como conclusión que la mayor potencia renovable instalada está en la energía eólica y es también la que mayor energía produce siguiéndole después en potencia instalada la solar y la hidráulica.

1.4. Evolución de la energía eólica

La energía eólica, al igual que el resto de energías renovables, se ha ido introduciendo a lo largo de los últimos años en el mundo, Europa, España y Andalucía. Y su introducción ha sido creciente en las últimas décadas pero con diferente pendiente según se hable del mundo, Europa, España o Andalucía.

El incremento en potencia instalada, y por tanto de energía producida, de manera renovable lleva consigo una política de incentivación para su utilización. Y es por ello, el motivo del notable aumento en los últimos años.

La política que está detrás del aumento de las energías renovables es el cumplimiento del Protocolo de Kioto, en el cual una serie de países se comprometieron para reducir la emisión de gases de efecto invernadero de manera gradual hasta alcanzar un objetivo común, de un porcentaje aproximado de al menos un 5%, dentro del periodo que va desde el año 2008 al 2012, en comparación a las emisiones al año 1990. Además de la concienciación en la utilización de energías renovables para el abastecimiento del consumo.

1.4.1. Energía eólica en el mundo

Según GWEC, Global Wind Report, el mercado eólico mundial se recuperó algo en 2011, gracias a un buen año en una serie de mercados nacionales. El mercado creció en un 6% en comparación con 2010, 40.5 GW de nueva potencia eólica instalada.

El mercado de EE.UU. hizo una recuperación respetable, Canadá hizo un año récord, y Europa se mantuvo en su camino pero con un mercado plano. Las instalaciones en alta mar en Europa disminuyeron ligeramente, pero hubo un fuerte crecimiento en Rumania, Polonia, Turquía, y Alemania.

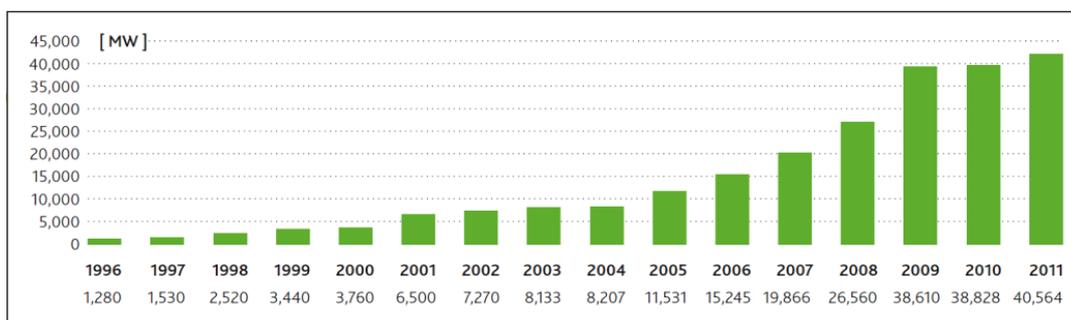


Figura 1.4. Potencia eólica anual instalada desde 1996-2011 en el mundo [7].

En las Figura 1.4 y Figura 1.5 se puede observar la evolución de la energía eólica en el mundo en la última quincena de años, llegando a finales de 2011 a los 238 GW de potencia acumulada, que representa un crecimiento acumulado de más del 20%, [7].

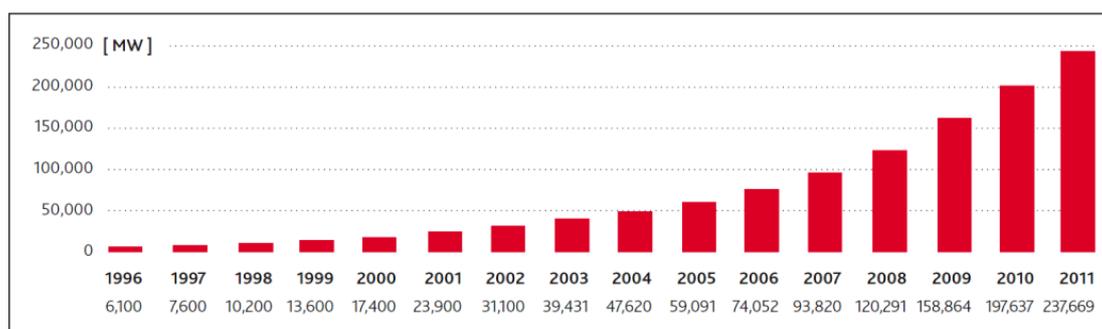


Figura 1.5. Potencia eólica acumulada desde 1996-2011 en el mundo [7].

En la Figura 1.6 se observa la aportación de los diferentes países en energía eólica tanto en potencia eólica instalada en 2011 como en potencia acumulada hasta dicho año. Los principales impulsores del crecimiento en el mercado global durante los últimos años son las potencias asiáticas de China y la India. El conjunto de los dos países representaron poco más del 50% del mercado mundial en 2011. Por otra parte, Brasil está empezando a la altura de su promesa, y junto con México serán los mercados de mayor crecimiento en el hemisferio occidental para los próximos años, y África del Sur.

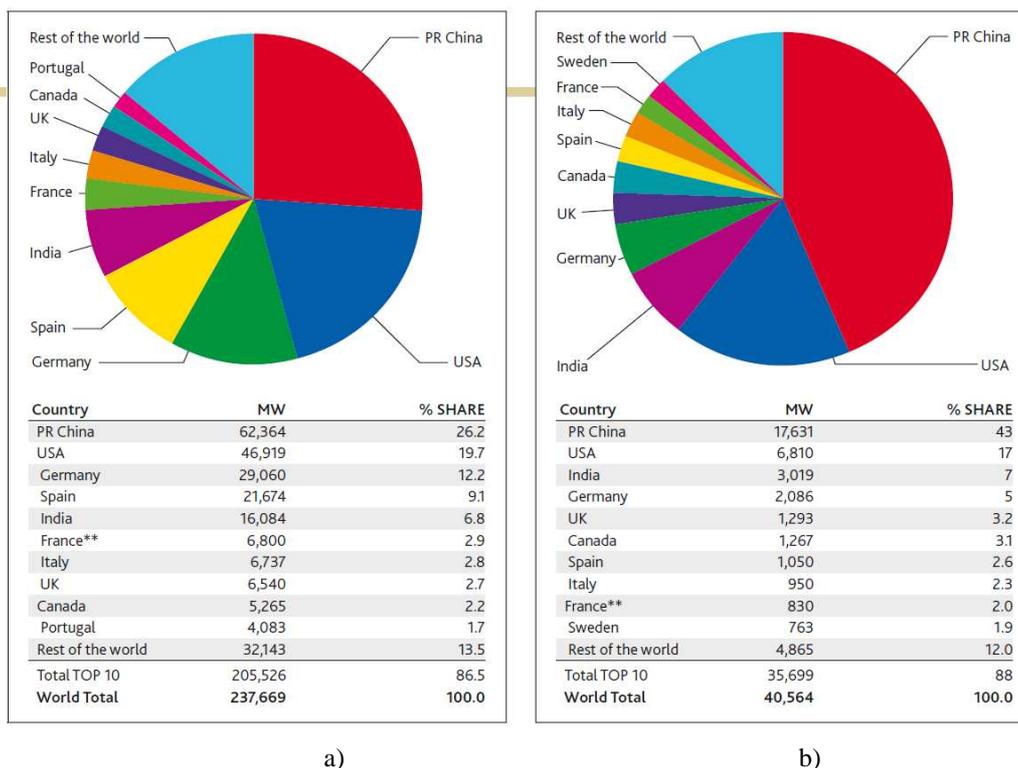


Figura 1.6. a) Top 10 Capacidad acumulada hasta 2011, b) Top 10 en potencia instalada en 2011 [7].

De cara al futuro, el panorama es desigual en los diferentes mercados, y un poco difícil de leer. Las principales incertidumbres sobre el futuro de la energía eólica son los problemas de red en China, los cambios en el código tributario indio, preguntas sobre el ritmo de desarrollo en Europa, y la política sin resolver en el Medio Oriente.

La mayoría de los mercados en crecimiento en el mundo están ahora fuera de los mercados tradicionales de Europa y América del Norte, mientras que el mercado chino se ha estabilizado durante un tiempo, el mercado de la India, Brasil y México está creciendo con fuerza.

Canadá y Australia son mercados potencialmente importantes que podrían aumentar considerablemente las cifras de crecimiento mundial, y Sudáfrica ha entrado ahora en el mercado.

La perspectiva para el próximo período es un poco sombría en comparación con las previsiones anteriores. En general, se espera ver tasas medias anuales de crecimiento de mercado de aproximadamente el 8%.

A finales de 2016 se prevé que exista una potencia eólica instalada acumulada en el mundo que ronde los 500 GW. Ya que existe un gran interés en los nuevos mercados con gran potencial de crecimiento (América Latina y África), aunque la mayor parte del mercado mundial se mantenga en Asia, Europa y América del Norte.

Asia seguirá siendo el mayor mercado del mundo, aunque con una tasa de crecimiento más lenta que en los últimos cinco años. China ha entrado en una fase de consolidación, y la mayor parte del crecimiento en la región durante los próximos cinco años será en la India.

El futuro del sistema energético de Japón está en juego, pero la mayoría de la gente quiere ver un futuro en el que las energías renovables sustituyan la totalidad o la mayor parte de la energía nuclear, y el gobierno está impulsando el desarrollo de la energía eólica marina. Por lo tanto, se espera un crecimiento en Japón en los próximos cinco años.

Se espera que Asia instale 118 GW de aquí a 2016, mucho más que cualquier otra región, y superar a Europa como el líder mundial en capacidad instalada acumulada durante 2013, finalizando el periodo con unos 200 GW en total.

El mercado europeo es el sello distintivo de la estabilidad por ello es improbable que haya grandes sorpresas. Se prevé que las instalaciones totales en Europa a partir de 2012-2016 aumenten en 65 GW, lo que lleva la capacidad instalada acumulada a poco más de 160 GW.

En el mercado de América del Norte (incluyendo México) se espera que tenga un fuerte 2012, como Canadá y México donde se instalarán más de 1000 MW para complementar lo que se espera en los EE.UU., que comenzó el año con más de 8 GW en construcción. Así pues, en general, se esperan poco más de 50 GW a ser instalados en América del Norte de 2012-2016, lo que hace un total de capacidad instalada de 100 GW a finales de 2016.

El mercado latinoamericano está dominado por Brasil, ahora afianzándose como un mercado internacional importante con una base industrial fuerte, que podría abastecer un creciente mercado regional. Chile, Argentina, Uruguay y algunos mercados más pequeños de América Central contribuirá durante el período, pero Brasil va a dar cuenta de alrededor de tres cuartas partes de los 8.6 GW de nuevas instalaciones que se están proyectando para 2012-2016, lo que reunirá un total de capacidad instalada de casi 11 GW.

En África y Oriente Medio se esperan que se instalen más de 8 GW durante los próximos 5 años, con lo que la capacidad total de casi 10 GW [7].

1.4.2. Energía eólica en Europa

Durante 2011, se instalaron 10281 MW de energía eólica en Europa, los países de la UE representan 9616 MW del total, cifra muy similar a 9648 MW de potencia instalada en 2010. De los 10281 MW, 9415 MW corresponden a potencia instalada en tierra y 866 MW en la costa.

En términos de instalaciones anuales, Alemania fue, con mucho, la mayor del mercado en el año 2011, con la instalación de 2086 MW. El Reino Unido ocupó el segundo lugar con 1293 MW incluyendo 752 MW de potencia en alta mar, seguido de España (1050 MW), Italia (950 MW), Francia (830 MW), Suecia (763 MW) y Rumania (520 MW).

La potencia total de energía eólica instalada en la UE a finales de 2011, en un año normal del viento, producen 204 TWh de energía eléctrica, suficiente para satisfacer el 6.3% del consumo total de energía eléctrica de la UE (frente al 5.3% en 2010).

Como se puede observar en la Figura 1.7, 2011 fue un año récord en nuevas instalaciones de generación de energía eólica en la UE, con 44.9 GW de nueva potencia instalada, un aumento del 3.9% respecto a 2010 [7].

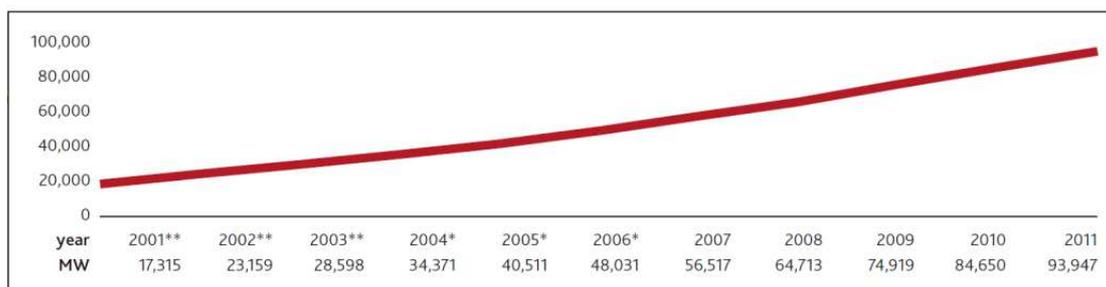


Figura 1.7. Potencia eólica acumulada en los últimos 10 años en Europa [7].

1.4.3. Energía eólica en España

El mercado eólico español ha crecido a una velocidad más baja en 2011 debido a la recesión económica y financiera y sólo ha experimentado un modesto crecimiento, como se puede observar en la Figura 1.8. Según la Asociación Española de Energía Eólica (AEE), se han instalado 1050 MW de nueva potencia eólica en 2011, llevando el total acumulado a 21673 MW.

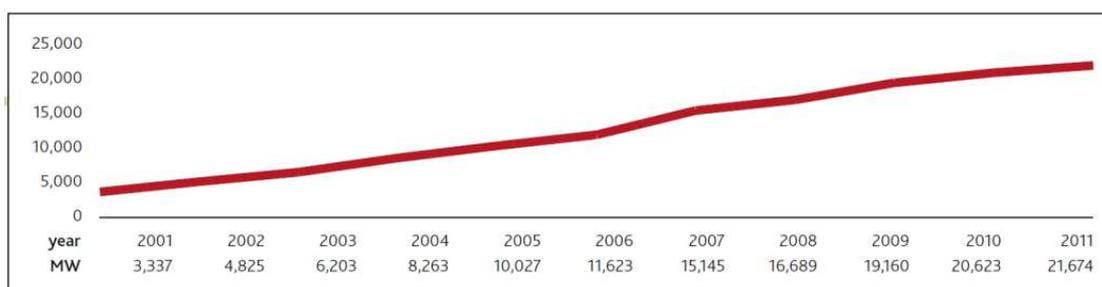


Figura 1.8. Potencia eólica acumulada en los últimos 10 años en España [7].

España se mantiene en la segunda posición en Europa, después de Alemania, en términos de potencia eólica total instalada. 2011 fue de nuevo un año con más viento que el promedio en España, generándose 42 TWh de energía eléctrica, que representa el 15.7% del consumo nacional de energía neta.

Como se puede observar en la Figura 1.9, por comunidades autónomas es Castilla y León con 5233 MW de potencia instalada la que lidera el panorama español, siguiéndole Castilla la Mancha, Andalucía y Galicia.

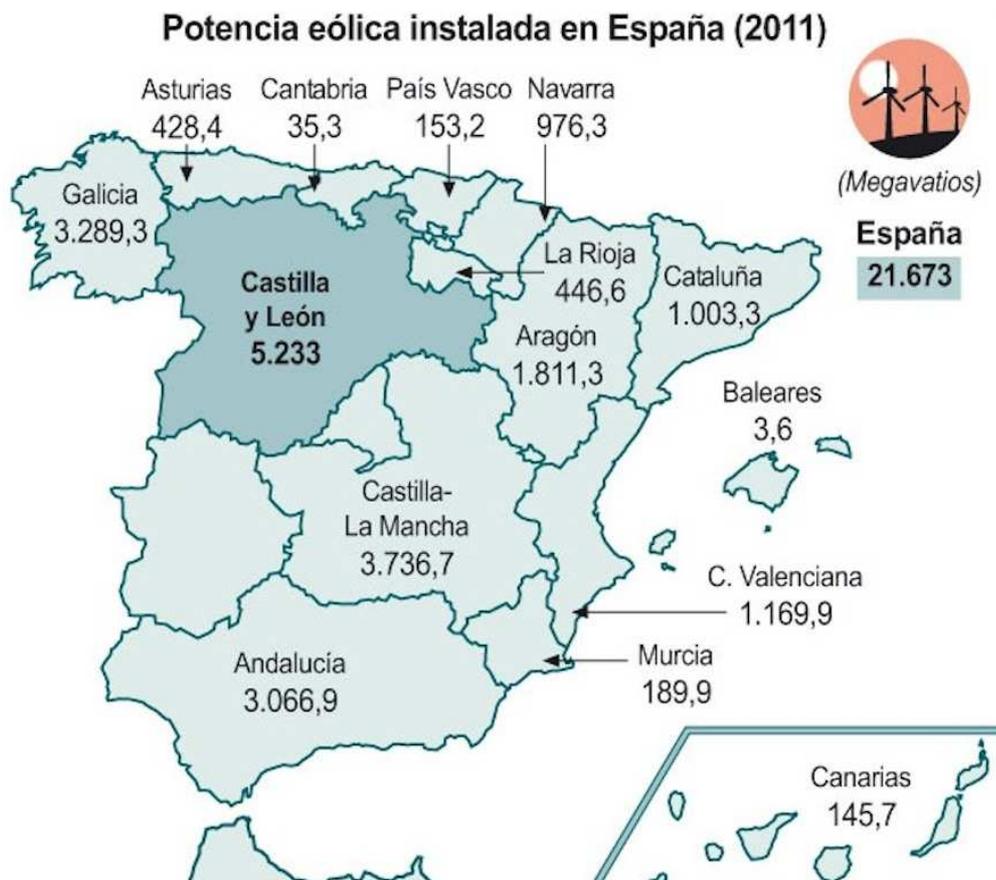


Figura 1.9. Potencia eólica acumulada en España en 2011 por comunidades [8].

Según GWEC (Global Wind Report), todas las fuentes de energía renovables combinadas producen alrededor del 33% de las necesidades de electricidad de España, con la energía eólica como mayor contribuyente [7].

El 6 de noviembre de 2011 a las 02 a.m. se alcanzó un nuevo récord cuando 59.6% de la demanda eléctrica de España fue suministrada por la energía eólica. Según estimaciones del Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía. (IDAE) para el periodo 2011-2020, la energía eólica en tierra firme debe ser superior a 100 GW en 2020, y llegar a más de 150 GW en 2030. El objetivo fijado para 2020 asciende a 35 GW de potencia eólica instalada..

1.4.4. Energía eólica en Andalucía

Actualmente, hay en Andalucía **136 parques eólicos**, con un total de **3092.73 MW instalados**, que funcionando a pleno rendimiento generarían durante un año la energía eléctrica que consumen 1300000 viviendas.

Como se puede observar en la Tabla 1.3 **Cádiz** es la provincia más destacada con el 51 % de la potencia eólica instalada. Le sigue **Almería** y **Málaga** con el 19% cada y **Granada** y **Huelva** con el 14% [9].

Tabla 1.3. Situación de la energía eólica en Andalucía 2012 [9].

Potencia instalada	Almería	Cádiz	Córdoba	Granada	Huelva	Jaén	Málaga	Sevilla	Andalucía
Eólica (MW)	462.79	1270.67	0.00	349.31	383.80	15.19	481.70	129.50	3092.96

1.5. Tipos de almacenamiento energético.

Las diferentes formas de almacenamiento de energía se incluyen en dos grupos diferentes, según la naturaleza del almacenamiento se pueden distinguir entre:

- Almacenamiento físico, como energía potencial, cinética, térmica o eléctrica.
- Almacenamiento químico, como energía contenida en los enlaces moleculares, tales como baterías.

Dentro del primer grupo se encuentran los siguientes tipos de almacenamiento:

Bombeo de agua para almacenarla. Una de sus principales ventajas es el amplio conocimiento de esta tecnología. Se utiliza para aplicaciones de alta potencia llegando a producirse decenas de GWh.

El principio de funcionamiento se basa en el bombeo del agua contenida en un depósito inferior a uno superior durante los periodos donde la demanda es baja mientras que cuando la demanda es elevada, el agua almacenada en el depósito superior se libera haciéndola pasar por unas turbinas generando energía eléctrica. El rendimiento de un ciclo completo del equipo de bombeo está entre el 65% y el 80% dependiendo del tipo de turbina y/o bomba que se utilicen [11,12].

El principal problema de este tipo de almacenamiento es la necesidad de poseer dos depósitos de mediana o gran capacidad con una diferencia de cotas considerable.

- **Almacenamiento de energía térmica.** Hay dos tipos diferentes de sistemas dependiendo de si se utiliza calor latente o sensible. El calor latente de fusión hace referencia a la transición líquido-sólido de un material a temperatura constante. Durante la acumulación el material pasa de estado sólido a líquido mientras que en la recuperación de la energía, se solidifica. Las transferencias de calor entre el acumulador térmico y el ambiente exterior se realiza a través de un flujo de transferencia térmica. La energía se almacena a una cierta temperatura, (a mayor calor, mayor acumulación de energía). Como elemento de almacenamiento se utiliza Hidróxido de sodio, aunque sea una sustancia altamente corrosiva, tiene una alta temperatura de fusión con un coeficiente de conductividad térmica adecuado siendo estable a altas temperaturas. Es una energía que se puede utilizar en el calentamiento de calderas para la producción posterior de energía eléctrica.

El almacenamiento de calor sensible se logra con el calentamiento de un material que no cambie de estado en la acumulación, bien sea agua a presión, sales fundidas, u otras sustancias. El calor se recupera para producir vapor de agua que acciona un sistema de turbinas.

El sistema puede almacenar grandes cantidades de energía sin riesgos de accidentes graves y no está sujeto a las restricciones geológicas. Las pérdidas debidas a la auto-descarga son relativamente pequeña, especialmente para sistemas muy grandes.

La eficiencia estimada de este tipo de sistemas ronda el 60%, y es estimada porque aún no se ha llevado a cabo ningún sistema de almacenamiento de este tipo [11,12].

- **Almacenamiento de energía mediante aire comprimido.** Se trata de una tecnología madura. Una turbina de gas utiliza casi dos tercios de la potencia disponible para comprimir el aire. Por tanto, las horas de baja demanda serán utilizadas para comprimir aire que será utilizado en la combustión que alimenta a la turbina. El calor residual de los gases se recuperan para calentar el aire. La presión del aire se encuentra entre 40 y 70 bares a temperatura ambiente que hace que el volumen de los depósitos sean mucho menores que las antiguas minas de sal subterráneas, y que el sistema sea más fácil de operar.

La eficiencia de este tipo de almacenamiento se encuentra en torno al 70% [11,12].

- **Almacenamiento en pequeña escala de aire comprimido.** El aire comprimido en alta presión (hasta 300 bares) se utiliza en aplicaciones de pequeña escala. Utilizando un compresor reversible, que funciona como generador cuando se recupera la energía. La eficiencia de este tipo de sistema ronda el 50%. El número de ciclos está limitado por la fatiga mecánica que sufren los depósitos, siendo estos algunas decenas de miles de ciclos [11].

- **Almacenamiento de energía mediante gas natural.** La idea es similar a la de almacenamiento subterráneo de gas, la diferencia está en la presión del gas al almacenarlo, que en este caso ronda los 200 bares [11].

- **Volante de Inercia** La inercia mecánica es la base de este método de almacenaje. Un disco pesado que rota es acelerado por un motor eléctrico, que actúa como generador cuando no se le aplica energía. La energía eléctrica se almacena como energía cinética. La fricción se debe mantener al mínimo para prolongar el tiempo de almacenamiento. Esto se logra colocando la rueda en el vacío y usando cojinetes magnéticos, lo cual hace que el método sea costoso.

Velocidades elevadas de la rueda permiten mayor almacenamiento pero requieren materiales con mayor resistencia para soportar la fuerza centrífuga [11,12].

Dentro del segundo grupo, se encuentran:

- **Baterías** En las baterías la energía eléctrica se almacena o libera mediante reacciones electroquímicas que transportan electrones a los electrodos (cátodo y ánodo), conectados por un electrolito. Se suelen utilizar catalizadores para acelerar las tasas de reacción a niveles aceptables.

La energía eléctrica se produce en corriente continua y para la aplicación en centrales de potencia normalmente se convierte a corriente alterna mediante un inversor.

Las baterías son costosas, requieren mucho mantenimiento y tienen una vida útil muy limitada [11].

- **Almacenamiento de Energía en Superconductores Magnéticos, SMES** almacenan energía electromagnética con pérdidas insignificantes mediante la circulación de corriente continua a través de bobinas superconductoras, enfriadas criogénicamente. La energía almacenada se puede lanzar de nuevo a la red descargando la bobina. El sistema utiliza un inversor/rectificador para transformar energía de corriente alterna a corriente continua o viceversa. Los SMES presentan menores pérdidas de energía eléctrica en comparación a otros métodos de almacenamiento de energía. El alto costo de los superconductores es la limitación principal para el uso comercial de este método de almacenamiento de energía.

Debido a las necesidades energéticas de refrigeración y a los límites en la energía total capaz de ser almacenada, los SMES se utilizan actualmente para el almacenamiento de energía por breves periodos de tiempo [11].

- **Supercondensadores** almacenan energía eléctrica en forma de cargas electrostáticas confinadas en pequeños dispositivos, formados por pares de placas conductoras separadas por un medio dieléctrico. Los supercondensadores tiene la capacidad de ser cargados y descargados en brevísimos periodos de tiempo, del orden de segundos o menos, lo cual los hace especialmente apropiados para responder ante interrupciones de suministro de poca duración [11].

1.6. Sistemas con energías renovables y almacenamiento

Existen pocos proyectos en la actualidad en los cuales se combinan las energías renovables con el almacenamiento de energía, uno de ellos es el proyecto 100% Energías Renovables de El Hierro que contempla la construcción de una central hidroeólica que abastecerá de energía renovable la demanda eléctrica de la isla. Mediante este proyecto, se convierte la isla de El Hierro en la primera isla del mundo en autoabastecerse única y exclusivamente con electricidad renovable [10].

El proyecto, con un coste de 54.3 millones de euros, está promovido por Gorona del Viento El Hierro, S.A., participada por el Cabildo Insular (60%), Endesa (30 %) y el Instituto Tecnológico de Canarias (10%).

El apoyo público que precisaba la iniciativa se ha concedido en el marco de las actuaciones que lleva a cabo el Gobierno en materia de ahorro, diversificación energética, aprovechamiento de las energías renovables y respeto al medio ambiente y por tratarse de un proyecto de alta innovación tecnológica y ejemplarizante, el cual permitirá poner en práctica un modelo de gestión energética integrada hidroeléctrica-eólica.

La isla canaria de El Hierro, Reserva Mundial de la Biosfera desde el año 2001, emerge de las aguas del Atlántico alcanzando rápidamente los 1500 metros de altitud, lo que da lugar a un paisaje singular de laderas escarpadas permanentemente azotadas por el viento. Tiene una superficie de 278 kilómetros cuadrados y una población de 10668 habitantes.



Figura 1.10. Esquema de funcionamiento [10].

El sistema estará compuesto, como se muestra en la Figura 1.10, por dos depósitos de agua, uno inferior con capacidad para 225000 metros cúbicos y otro depósito superior, aprovechando una caldera volcánica natural, con una capacidad para 500000 metros cúbicos; un parque eólico de 10 MW; una central hidroeléctrica de 10 MW con un salto neto de 682 metros; una central de bombeo; y una central de motores diesel ya existente la cual entraría en funcionamiento en casos excepcionales de emergencia en los que no hubiera ni agua ni viento suficientes para cubrir la demanda.

La demanda eléctrica prevista para el diseño, basada en la planificación energética de Canarias (PECAN 2006), es de 48 GWh/año en el año 2015; y para el dimensionamiento de la conducción de agua y los depósitos, por no ser ampliables, se ha tenido en cuenta la demanda prevista para el 2030.

Con el sistema hidroeólico, en definitiva, se consigue transformar una fuente de energía variable en un suministro controlado y constante de energía eléctrica, maximizando el aprovechamiento de la energía eólica. La mayor parte de la energía vertida a la red de distribución de la isla provendrá de la central hidroeléctrica, utilizándose la mayoría de la energía eólica generada para alimentar el sistema de bombeo y, por tanto, ser almacenada en forma de energía potencial en el depósito superior, lo que garantiza la estabilidad de la red de distribución. El excedente de energía eólica se verterá directamente a la red, sirviendo para la desalación de agua en las dos plantas que tiene El Hierro para ese efecto.

Con este proyecto, los beneficios medioambientales son evidentes, se evitará el consumo anual de 6000 toneladas de diesel, lo que equivale a 40000 barriles de petróleo que tendrían que llegar importados y en barco a la isla, y supone un ahorro de más de 1.8 millones de euros anuales.

Así mismo, se evitará la emisión a la atmósfera de 18700 toneladas al año de CO₂, principal causante del efecto invernadero. También se evitará la emisión a la atmósfera de 100 toneladas anuales de dióxido de azufre y de 400 toneladas anuales de óxidos de nitrógeno.

La similitud entre el proyecto llevado a cabo en la isla de El Hierro y el que se va a desarrollar en este trabajo es considerable, ya que, tanto el sistema de almacenamiento (almacenamiento a través de la energía potencial del agua) como el tipo de energía renovable (energía hidráulica y energía eólica) que se va a tener en cuenta son los mismos.

Las principales diferencias entre ambos proyectos son la utilización de una base de energía convencional en el trabajo que se va a realizar mientras que en el proyecto de El Hierro toda la energía que se utiliza es renovable, (excepto algún caso de emergencia en el cual se abastecería a la población de energía eléctrica proveniente de unos grupos diesel). Y la interconexión con el exterior que en la isla no existe.

Por tanto, el funcionamiento de ambos proyectos son similares.

El sistema híbrido que va a tratar este trabajo funciona de la siguiente manera:

La demanda instantánea energética va a ser cubierta en un cierto porcentaje por una base de energías convencionales y el resto lo ha de aportar la energía eólica generada en el instante. Si hay excedente de energía eólica se almacena en forma de energía potencial bombeando agua de un depósito inferior a otro superior para que en los momentos en los que haya déficit en la cobertura de la demanda poder turbinarla.

Además, también existe una serie de interconexiones con el exterior que hacen al sistema eléctrico más robusto y fiable a la vez que permite importar o exportar energía según las necesidades.

1.7. Objetivos

Ante la variabilidad en la energía producida con energías renovables debido a las condiciones meteorológicas, hay que tener algún método con el cual se pueda introducir este tipo de energías en el sistema eléctrico de forma segura, fiable y con continuidad.

La manera de implementar las energías renovables, en la actualidad, es con conexión prácticamente directa, basándose en datos estadísticos, en resultados de días anteriores y en las previsiones de los días siguientes.

Así pues, se quiere llegar a tener la posibilidad de ofertar una cierta cantidad de energía para un determinado periodo de tiempo y con una antelación suficiente para poder casarla con la demanda del mercado sin depender tanto de las condiciones meteorológicas.

El método que se va a desarrollar a lo largo de este proyecto va a ser el de un sistema híbrido de energía eólica con energía hidráulica teniendo además una base de energía térmica y pudiendo importar o exportar energía al exterior según las necesidades del sistema, a través de una serie de líneas con una cierta capacidad máxima.

El exceso de energía producida de los aerogeneradores se almacena en forma de energía potencial, con agua en un depósito superior. En las horas de menor demanda se bombea agua de un depósito inferior a otro superior sin tener que parar la producción de energía mientras que en las de mayor consumo, el agua que previamente se ha almacenado en el depósito superior se turbinada produciendo energía eléctrica. Todo esto se quiere realizar de la forma más óptima posible y en varios escenarios diferentes.

Para ello, se tienen en cuenta la demanda eléctrica diaria en España, las posibles energías disponibles: energía térmica, energía eólica, energía turbinada de la que está almacenada en un embalse y energía importada (Pudiendo bombear y exportar energía en caso de exceso de energía producida) y los costes de cada una de ellas.

Los objetivos que se plantean en este proyecto son los siguientes:

- ❖ Modelar el problema de optimización de los recursos ante diferentes escenarios.
- ❖ Implementar el modelo en un programa informático de optimización.
- ❖ Presentar los resultados para la demanda durante dos días en el ámbito Nacional y extraer conclusiones.

1.8. Organización del proyecto

Este proyecto está organizado en cuatro capítulos siendo el primero de ellos la *Introducción*. En la primera parte de ella se describe la motivación que ha llevado a la realización de este proyecto y los objetivos del mismo. En la segunda parte del primer capítulo se describe el sistema eléctrico español actual junto con un desarrollo de energías renovables. También está incluida la evolución de la energía eólica en el ámbito mundial, europeo, español y andaluz. Y se incluye de manera general los tipos de almacenamiento de energía existentes junto con un poco de historia de sistemas híbridos. Además se comentan las partes que componen el sistema híbrido de almacenamiento que se va a tratar en el proyecto.

El segundo capítulo, llamado *El problema de optimización*, incluye el modelo con el que se va a optimizar el problema en el programa informático de optimización. En este capítulo se introducen y justifican las simplificaciones adoptadas a fin de representar el complejo sistema eléctrico español. También se describe el funcionamiento del sistema.

El tercer capítulo es el de *Resultados*. En él existe un apartado en el que se adecúan los parámetros de entrada a las características del sistema y, estos parámetros actualizados se introducen en el programa informático GAMS. Tras realizar la simulación se obtienen los resultados.

El capítulo de resultados se compone de dos subapartados. El primero de ellos trata el problema de optimización con la energía eólica constante en función de un porcentaje fijo de la demanda, mientras que el segundo hace lo mismo pero tomando la energía eólica variable en función del viento.

En este capítulo se desarrollan diferentes simulaciones con diferentes porcentajes de energía para abarcar numerosas situaciones posibles.

Y, por último en el cuarto capítulo llamado *Conclusiones* se incluye un análisis conclusivo en el cual se resumen las principales ideas extraídas en la elaboración del proyecto y se describen las posibles mejoras futuras.