

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Carrera

**TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO DE
ENERGÍA EN LA RED ELÉCTRICA**
(Energy storage technologies in the
electricity grid)

Para acceder al Título de

INGENIERO DE TELECOMUNICACIÓN

Autor: Alberto García Gorría

Septiembre - 2017

INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

CALIFICACIÓN DEL PROYECTO FIN DE CARRERA

Realizado por: Alberto García Gorría

Director del PFC: Jesús Mirapeix Serrano

Título: “Tecnologías de almacenamiento de energía en la red eléctrica”

Title: “Energy storage technologies in the electricity grid”

Presentado a examen el día: 28 de Septiembre de 2017

para acceder al Título de

INGENIERO DE TELECOMUNICACIÓN

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): Cobo García, Adolfo

Secretario (Apellidos, Nombre): Mirapeix Serrano, Jesús

Vocal (Apellidos, Nombre): Quintela Incera, Antonio

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del PFC
(sólo si es distinto del Secretario)

Vº Bº del Subdirector

Proyecto Fin de Carrera Nº
(a asignar por Secretaría)

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. Contexto y objetivo	5
2. ENERGÍAS RENOVABLES.....	7
2.1. Introducción	7
2.2. Definición de energía renovable (EERR)	8
2.3. Energía Sostenible	8
2.4. ¿Por qué surgen las EERR?	10
2.4.1. Agotamiento de los combustibles fósiles	10
2.4.2. Seguridad en el suministro eléctrico.....	11
2.4.3. Aumento de la demanda energética mundial.....	11
2.4.4. Cambio climático y desarrollo sostenible.....	12
2.5. Panorama actual: EERR en el contexto mundial.....	17
2.6. Panorama actual: EERR en España.....	22
2.7. Ventajas y desventajas de las EERR	26
3. ALMACENAMIENTO DE ENERGIA EN LA RED ELECTRICA	28
3.1. Introducción	28
3.2. Factores esenciales en el almacenamiento de energía	28
3.2.1. Curva de demanda	29
3.2.2. Integración en EERR.....	31
3.3. Tecnologías de almacenamiento	32
3.3.1. Almacenamiento mecánico.....	32
3.3.1.1. Aire comprimido	32
3.3.1.2. Hidráulica de bombeo.....	35
3.3.1.3. Volantes de inercia	38
3.3.2. Almacenamiento térmico.....	40
3.3.3. Almacenamiento electromagnético	43
3.3.3.1. Almacenamiento en ultracondensadores	43
3.3.3.2. Almacenamiento en imanes conductores (SMES)	48
3.3.4. Almacenamiento electroquímico	51
3.3.4.1. Almacenamiento de hidrógeno.....	51
3.3.4.2. Pila de combustible.....	54
3.3.4.3. Almacenamiento en baterías.....	57
3.4. Almacenamiento a pequeña escala.....	67
3.5. Conclusiones.....	69

4. SMART GRIDS	73
4.1. Red eléctrica actual	73
4.2. Smart Grids.....	74
4.2.1. Concepto de <i>Smart Grid</i>	75
4.2.2. Principales características y aspectos de las <i>Smart Grids</i>	77
4.2.2. Arquitectura y protocolos	79
4.2.3. Integración de sistemas de almacenamiento en <i>Smart Grids</i>	80
4.2.3.1. Proyecto TILOS.....	81
4.2.3.2. Proyecto Nice Grid	81
4.2.3.3. Proyecto Walkiria	82
4.3. Conclusiones.....	83
5. BIBLIOGRAFIA	85
5.1. Bibliografía utilizada.....	85
5.2. Índice de figuras	91

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto y objetivo

Hoy en día nos es difícil poder llegar a imaginar un mundo en el cual no tengamos un suministro eléctrico capaz de iluminar nuestros hogares o que ponga en funcionamiento nuestras fábricas. La energía eléctrica se ha convertido en un componente indispensable, ya que estamos en constante contacto con dispositivos que nos ayudan a realizar múltiples tareas. Actualmente, la demanda de energía, con miras al desarrollo social y económico y a la mejora del bienestar y la salud de las personas, va en aumento. Todas las sociedades necesitan de servicios energéticos para cubrir necesidades como iluminación, cocina, movilidad, comunicación, etc. Evidentemente, no son iguales las necesidades eléctricas de la actualidad frente a las de hace más de 50 años atrás.

Sin embargo, todo este crecimiento conlleva que sea necesaria una mayor generación de electricidad, la cual es obtenida en la mayoría de los casos a partir de los combustibles fósiles (carbón, gas, petróleo). El uso generalizado de estos combustibles, la destrucción de grandes masas forestales está favoreciendo, en el contexto del cambio climático, el aumento de la temperatura de la Tierra, lo que a corto plazo puede producir efectos altamente negativos para la vida en nuestro planeta.

Otro problema añadido es que esta energía que se obtiene del carbón, del petróleo y del gas no se renueva y se va agotando año tras año. Lo inteligente es ir aprovechando otras fuentes de energía que están a nuestro lado: viento, sol, residuos, etc., las cuales son renovables año tras año, no se agotan y además (en la mayoría de los casos) no contaminan el ambiente.

Las energías renovables se han convertido en elementos indispensables en la generación energética a nivel mundial. Sin embargo, algunas de estas tecnologías ofrecen escasas garantías de capacidad frente a las energías más tradicionales. Esto implica que tiene que existir un equilibrio entre la energía demandada y la energía generada, ya que todavía no existen tecnologías que permitan un almacenamiento de energía lo suficientemente grande en la red eléctrica.

Por otro lado, las energías renovables favorecen un nuevo concepto de generación distribuida dentro del marco eléctrico, surgiendo así una nueva generación de red eléctrica inteligente o *Smart Grids*.

En el presente proyecto se analizarán las principales tecnologías de almacenamiento de energía en la red eléctrica, así como futuras soluciones. Se estudiarán sus principales características, detallando las ventajas y desventajas de las distintas tecnologías implicadas. También se analizará su integración en la red eléctrica inteligente o *Smart grids*.

Para poder entender estas tecnologías se llevará a cabo en primer lugar un análisis de las energías renovables y de su situación tanto en España como en el mundo.

2. ENERGIAS RENOVABLES

2.1. Introducción

El primer aspecto a realizar será refrescar el concepto de energía, así como explicar sus diferentes tipos.

Según la RAE se define energía como: “Capacidad para realizar un trabajo. Se mide en julios (Simb. E). [1]

Hay que tener claro que no siempre que hablamos de energía, en el contexto de las energías renovables, tenemos que pensar que estamos hablando de energía eléctrica. Como ejemplos, la energía solar térmica o las fuentes de origen biológico y residuos o la energía geotérmica que pueden basarse únicamente en la generación de calor.

Fuente energética	Usos		
	Generación eléctrica	Generación de calor y frío	Transporte
Solar	 Solar fotovoltaica  Solar termoeléctrica	 Solar térmica de media y baja temp.	
Eólica	 Onshore  Offshore		
De origen biológico y residuos	 Biomasa y residuos  Biogás	 Biomasa  Biogás	 Bioetanol  Biodiésel  Biolíquidos Biogás
Marina	 Corrientes, mareas y olas  Ósmosis		
Geotérmica	 Convencional  Estimulada	Procesos industriales  Bomba de calor  "District heating"	
Hidroeléctrica	 Mini hidroeléctrica		
Otras	Sistema de almacenamiento de energía de origen renovables (electricidad, térmica)		 Coche eléctrico

Figura 1: Esquema de fuentes energéticas y usos [2]

Habría que diferenciar entre energía primaria, energía final y energía útil [3]:

- *Energía primaria*: son recursos naturales que se obtienen de manera directa, como la energía hidráulica o la luz solar, o de manera indirecta, como el gas natural o el carbón mineral. Debido a que son primarias, se reciben de manera directa, ya que es la energía entrante al sistema, antes de cualquier proceso de transformación para su uso por el usuario.
- *Energía final*: cuando el proceso ha terminado y podemos utilizar en nuestra propia casa o en el transporte público la fuente energética.

2.2. Definición de energía renovable (EERR)

Las energías renovables son aquellas que se producen de forma continua y son inagotables a escala humana; se renuevan continuamente, a diferencia de los combustibles fósiles, de los que existen unas determinadas cantidades o reservas, agotables en un plazo más o menos determinado. [4]

Las principales formas de energías renovables que existen son: la biomasa, hidráulica, eólica, solar, geotérmica y las energías marinas.

Las energías renovables provienen, de forma directa o indirecta, de la energía del Sol; constituyen una excepción la energía geotérmica y la de las mareas.

Podemos ver otra definición de energía renovable (y energía no renovable):

- *Energía renovable*: estas se pueden clasificar como provenientes del sol (directa o indirectamente), o no solares (mareomotriz y geotérmica).
- *Energía no renovable (Brown Energy)*: se genera energía a partir de combustibles fósiles (carbón, gas natural y petróleo), y combustibles nucleares. Estas fuentes se encuentran en la naturaleza de manera limitada y su extinción supone un problema a largo plazo pues no pueden ser sustituidas.

2.3. Energía Sostenible

La energía sostenible se puede definir como aquella energía capaz de satisfacer las necesidades presentes sin comprometer los recursos y capacidades de las futuras generaciones. [5]

La energía sostenible está compuesta de energías renovables y alternativas, además de la energía de fusión. La siguiente lista describe cuáles son las energías que pueden considerarse sostenibles;

□ *Energía Solar Fotovoltaica*; es la energía que aprovecha la energía del Sol para producir electricidad.

□ *Energía Solar Térmica*; es la energía que aprovecha la energía del Sol para producir calor.

□ *Energía Termosolar*; también aprovecha la energía del Sol para generar calor y posteriormente electricidad por medio de una turbina de vapor.

□ *Energía Eólica*; es la energía que aprovecha el viento para generar electricidad.

□ *Energías Marinas*; se dividen en 5 tipos:

1. *Energía Undimotriz u olamotriz*; es la energía que aprovecha el movimiento de masas de agua (olas).
2. *Energía Maremotérmica o de gradiente térmico*; es la energía que aprovecha la diferencia de temperaturas entre el fondo y la superficie de los océanos.
3. *Energía Mareomotriz*; es la energía que aprovecha las mareas.
4. *Energía de corrientes marinas*; es la energía obtenida de las corrientes marinas.
5. *Energía Azul o de potencia Osmótica*; es la energía obtenido a partir de la diferencia entre la concentración de sal del agua de mar y del agua de río. También se conoce como energía de Gradiente Salino.

□ *Energía Geotérmica*; es la energía que aprovecha el calor del interior de la Tierra para generar calor y/o electricidad.

□ *Biomasa*; es la energía que obtiene aprovecha la materia orgánica para generar electricidad y/o calor.

□ *Energía Hidroeléctrica*; es aquella que aprovecha la energía cinética y potencial de corrientes de agua, saltos, ríos, etc.

□ *Energía de Fusión*; es la energía que se libera en la fusión de núcleos atómicos.

2.4. ¿Por qué surgen las EERR?

Analizar el nacimiento y la relevancia de las energías renovables puede ser un problema complejo ya no existe una única respuesta. Algunos factores clave en este ámbito pueden ser:

- ☐ Agotamiento de los combustibles fósiles
- ☐ Seguridad en el suministro eléctrico
- ☐ Aumento de la demanda energética mundial
- ☐ Cambio climático y Desarrollo sostenible

2.4.1. Agotamiento de los combustibles fósiles

El sistema energético actual está fundamentalmente basado en los combustibles fósiles. El ritmo de consumo es tan alto que lo que se consume en un año la naturaleza tarda en torno a un millón de años en producir, por lo que el posible agotamiento de las reservas es una realidad.

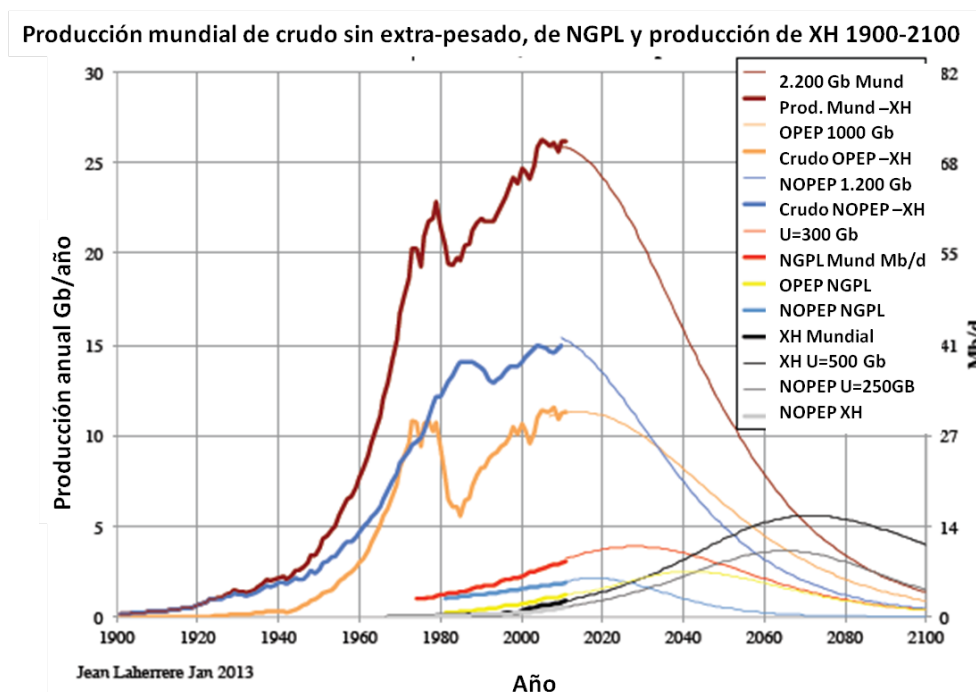


Figura 2: Estimación de la producción mundial de Petróleo crudo y Líquidos del Gas Natural (NGL) [7]

Esta grafica refleja como no va a ser posible mantener los niveles de producción de los combustibles fósiles en los próximos años.

Según el informe de Bloomberg New Energy Finance, New Energy Outlook 2016, en menos de una década, la era de los combustibles fósiles va a llegar a su fin, y no solo se refiere al petróleo sino también al gas y al carbón. De hecho, no se va a producir una revolución en el consumo de gas porque las energías renovables van a adelantarse y colocarse como las primeras tecnologías en abastecer de electricidad y energía al mundo de aquí a los próximos 25 años.

Y la razón no está en la falta de carbón, petróleo o gas, sino porque la alternativa renovable será mucho más barata y asequible gracias a la continua rebaja de sus costes, al desarrollo del almacenamiento de la energía y al progreso del uso del coche eléctrico, que llegará más rápido de lo esperado.[6]

2.4.2. Seguridad en el suministro eléctrico

Al hablar de seguridad en el suministro eléctrico aludimos al concepto de dependencia energética, que es básicamente la compra de recursos o energía a otros países productores.

Sin embargo estos condicionantes geo-políticos pueden afectar a la seguridad del suministro en el caso de que no se cumpla lo acordado, tenemos los ejemplos de Oriente Medio con el petróleo o conflicto ruso-ucraniano por el suministro de gas a buena parte de Europa a través del oleoducto

España lamentablemente no dispone de muchos recursos o infraestructuras necesarias para poder autoabastecerse, con una dependencia energética del 72.3%.[7]

2.4.3. Aumento de la demanda energética mundial

En las ultimas décadas debido al fuerte crecimiento demográfico y al desarrollo tecnológico la demanda de energía ha crecido de manera significativa.

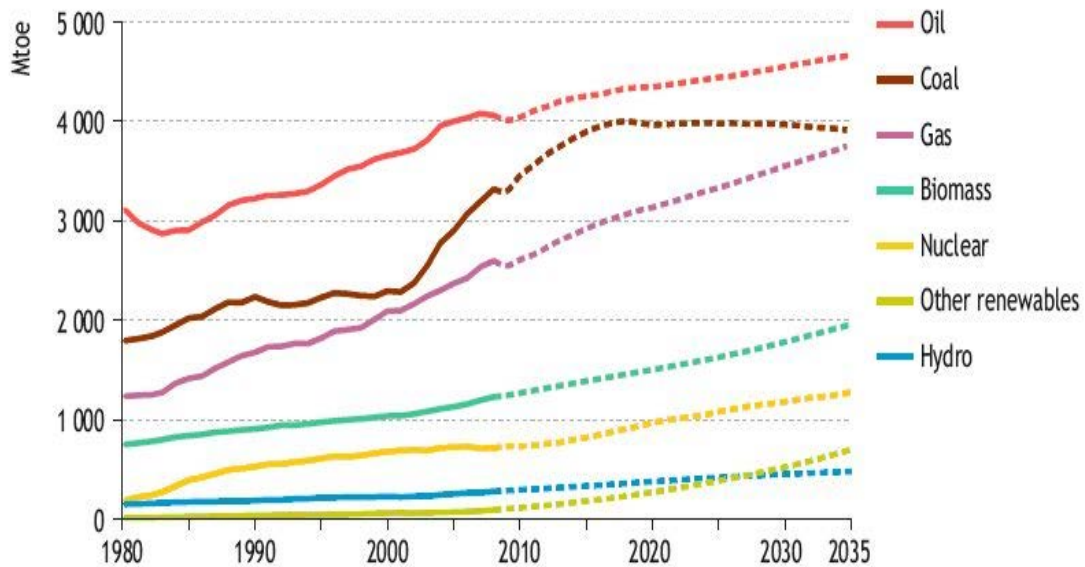


Figura 3: Histórico y previsiones de consumo de energía primaria en el mundo [8]

Como conclusiones de la gráfica sacamos:

- ☐ Crecimiento en la demanda de todas las fuentes de energía.
- ☐ Las principales fuentes energéticas primarias son los combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas).
- ☐ Las energías renovables a partir del 2005 empiezan a aumentar y a tener una contribución significativa.

2.4.4. Cambio climático y desarrollo sostenible

No cabe duda que a día de hoy uno de los impulsores del desarrollo e implantación de las energías renovables es el cambio climático o también conocido como calentamiento global.

A continuación vamos a analizar algunos aspectos clave:

- ☐ *Efecto invernadero (Green house effect)[9]*

Está relacionado con la radiación que entra y sale de nuestra atmósfera, así como la capacidad de ciertos gases de influir notablemente en estos procesos. Los gases de efecto invernadero (GHGs: *Green House Gases*) más importantes son: vapor de

agua, dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nítrico (N_2O), clorofluorcarbonos (CFC) y ozono (O_3).

El oxígeno y el hidrógeno que son los gases más presentes en nuestra atmósfera no generan efectos relevantes sobre el clima. Sin embargo, algunos gases actúan en forma tal que permiten que la radiación solar penetre hasta la superficie terrestre y atrapan la radiación infrarroja ascendente emitida por la Tierra, que de otro modo escaparía al espacio. Así se genera un fenómeno denominado efecto invernadero, por analogía a lo que ocurre en los invernaderos, en los que el vidrio actúa permitiendo el paso de la radiación solar y retiene la radiación infrarroja emitida dentro del invernadero.

El efecto invernadero es un fenómeno que ocurre en forma natural en la atmósfera. No obstante, su efecto beneficioso puede ser modificado por actividades humanas que aumentan la concentración en la atmósfera de muchos de los gases que lo producen.

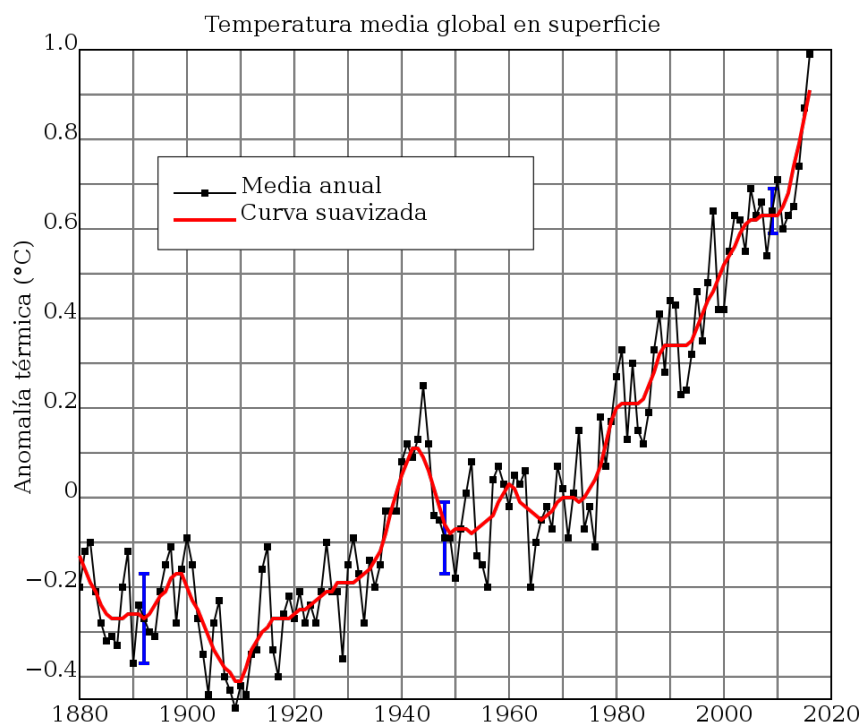


Figura 4: Media global del cambio de temperatura en la tierra y el mar en 1880-2016, respecto a la media de 1951-1980. La línea negra es la media anual y la roja la media móvil de cinco años. [10]

Como se aprecia en la gráfica se ha producido un aumento de la temperatura media global del último siglo, debido a la actividad industrial que produce una mayor concentración de gases invernadero.

□ Cambio climático: feedbacks positivos y negativos [11]

Analizaremos mediante feedbacks o retroalimentaciones el efecto positivo (querrá decir que refuerza el efecto del cambio climático) y el efecto negativo (será positivo para evitar el calentamiento global).

Feedbacks positivos:

a) Vapor de agua: como vimos antes al tener una mayor concentración en la atmósfera de GHGs, esto implicará un aumento de la temperatura del planeta, lo que a su vez provocará una mayor evaporación del agua en los océanos aumentando así aún más la temperatura. Sin embargo el vapor de agua también contribuye a la formación de nubes bajas, las cuales reflejan parte de la radiación solar incidente, lo cual podemos considerar en feedback negativo.

b) Nubes altas: Si el vapor de agua resulta en la formación de nubes altas, éstas tienen el efecto de bloquear más la radiación infrarroja (IR) saliente que la luz visible entrante, por lo que implican un aumento de temperatura.

c) Liberación de GHGs: Varios gases de efecto invernadero están atrapados en diferentes reservas, como por ejemplo en los océanos o en la tundra o permafrost siberiano. Un aumento en las temperaturas implicaría un deshielo acelerado de este permafrost (un millón de kilómetros cuadrados en el oeste de Siberia) y una mayor liberación de metano o una mayor liberación del CO₂ contenido en los océanos, contribuyendo ambos efectos al calentamiento global.

d) Efecto albedo: La palabra albedo proviene del latín “albus”, que significa luz blanca o color pálido. Puede definirse como la cantidad de radiación solar que es devuelta a la atmósfera tras chocar con la superficie terrestre, este parámetro variará entre 0 y 1. La variación del albedo se debe al color de la superficie que recibe los rayos. De esta manera, si un aumento de temperaturas disminuye la superficie de hielo (mayor reflectividad) en el planeta, esto incrementará la absorción de la radiación incidente, propiciando así un mayor aumento de las temperaturas. El valor medio del albedo en la Tierra es de 0.367.

Además el albedo puede alterarse de forma natural, con la presencia de catástrofes, como incendios forestales, huracanes o plagas.

e) Deforestación: Sequías, fuegos y desertización son fenómenos que afectan a las masas forestales del planeta. Todos ellos implican la liberación de grandes reservas de CO₂ fijadas en la vegetación a la atmósfera, lo que lógicamente favorece el calentamiento global.

Feedbacks negativos:

a) Radiación de cuerpo negro: La radiación emitida por la Tierra se puede modelar como si ésta fuera un cuerpo negro (un material ideal que absorbe toda la radiación incidente y emite también radiación electromagnética dependiendo de su temperatura). La cantidad total de energía es directamente

dependiente de la temperatura según la siguiente expresión: $F = gT^4$. Esto implica que si aumentase la temperatura de la Tierra, ésta emitiría una mayor cantidad de energía EM (en la zona del IR), favoreciendo una reducción de la temperatura.

b) Nubes bajas: Si un mayor nivel de vapor de agua derivado de mayores temperaturas deriva en la formación de más nubes bajas, estaríamos hablando de un feedback negativo, ya que estas nubes reflejan y absorben parte de radiación incidente en el rango visible (entre aproximadamente 400 y 700nm).

c) Efecto “fertilizador” del CO₂: mayores niveles de CO₂ en la atmósfera estimularían un mayor crecimiento de plantas, que a su vez absorberían más CO₂ y limitarían el efecto del calentamiento global. Evidentemente este efecto tiene que ser considerado junto con los otros derivados de mayores niveles de CO₂ para obtener una evaluación global.

d) Eliminación espontánea del CO₂ en la atmósfera: Existen varios fenómenos naturales que deberían llevar a una mayor absorción de CO₂ por parte de los océanos si aumentase el nivel de CO₂ en la atmósfera. Ejemplos de estos procesos son el desgaste químico de rocas y la formación de conchas. Sin embargo, estamos hablando de procesos que operan en escalas temporales muy grandes, por lo que su influencia en el cambio climático no está clara.

□ Predicciones para el cambio climático en el siglo XXI:

Tendremos que esperar a ver como responden los gobiernos al Acuerdo de París, el cual es un acuerdo dentro del marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático que establece medidas para la reducción de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GHGs) a través de la mitigación, adaptación y resiliencia de los ecosistemas a efectos del calentamiento global, su aplicabilidad sería para el año 2020, cuando finaliza la vigencia del Protocolo de Kioto. [12]

Lo que si está claro es que, si no se reducen dichas emisiones, las consecuencias pueden ir más allá de lo esperado. Diferentes equipos investigadores de todo el mundo han desarrollado modelos que estiman el aumento de temperatura que podría sufrir la Tierra si las emisiones continúan como hasta ahora. Los resultados de la Figura 5 muestran como las predicciones oscilan entre 1.8 y 6 °C.

Proyecciones del calentamiento global

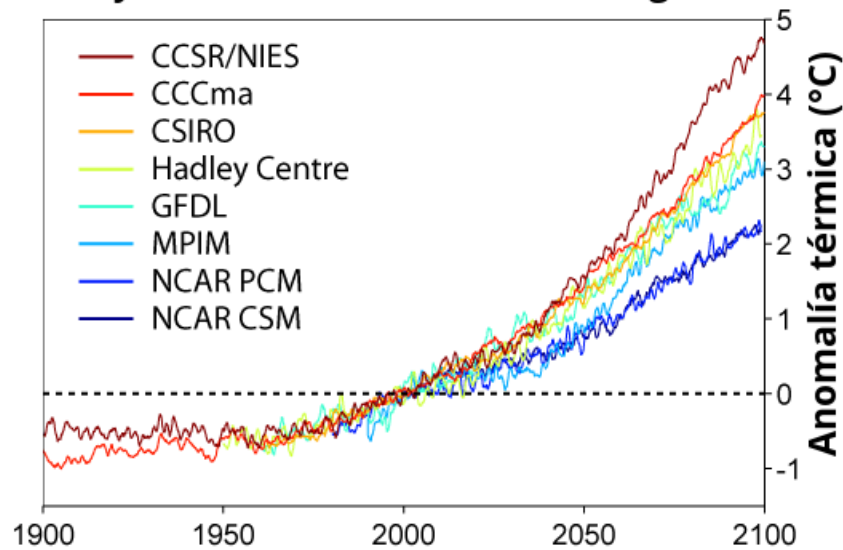


Figura 5: Predicción de calentamiento global sin reducción de emisiones[10]

□ Conclusiones

- 1) El cambio climático es un hecho y que ha sido fundamentalmente provocado por el hombre está ya asumiendo por la comunidad científica internacional.
- 2) El calentamiento global implica serios riesgos para el ser humano y los ecosistemas que nos rodean. Por ello, desde hace años diversos organismos y gobiernos han desarrollado iniciativas plasmadas en diferentes acuerdos, como el Protocolo de Kyoto o el Acuerdo de París, para tratar de luchar contra este fenómeno.
- 3) Las energías renovables son un factor clave en la transformación que debe sufrir el sector energético y la sociedad en general en la lucha contra el cambio climático. Van tener un gran protagonismo en las próximas décadas con el probable abandono de los combustibles fósiles.
- 4) En los últimos años se está realizando un gran esfuerzo en tecnologías que permitan, no ya reducir las emisiones de GHGs a la atmósfera, sino la captura de dichos gases, en particular del CO₂ de la atmósfera. Nos referimos a estrategias activas para la reducción de los niveles de estos gases, donde no sólo hay que considerar su captura sino también su almacenamiento (en yacimientos geológicos, en los océanos, etc.). Para su éxito dependerán del apoyo económico y la solución de problemas tecnológicos (peligrosidad de las reservas de CO₂).

2.5. Panorama actual: EERR en el contexto mundial

Analizado el concepto de energía renovable, el porque de su origen y su relevancia en la sociedad actual, nos dispondremos a analizar la situación actual de las energías renovables en el marco del sector energético mundial.

Como primer dato importante veremos la relevancia que tienen las EERR en la cobertura a nivel mundial de las energías primarias.

Cuota estimada de energía renovable, en el consumo mundial final de energía, 2014

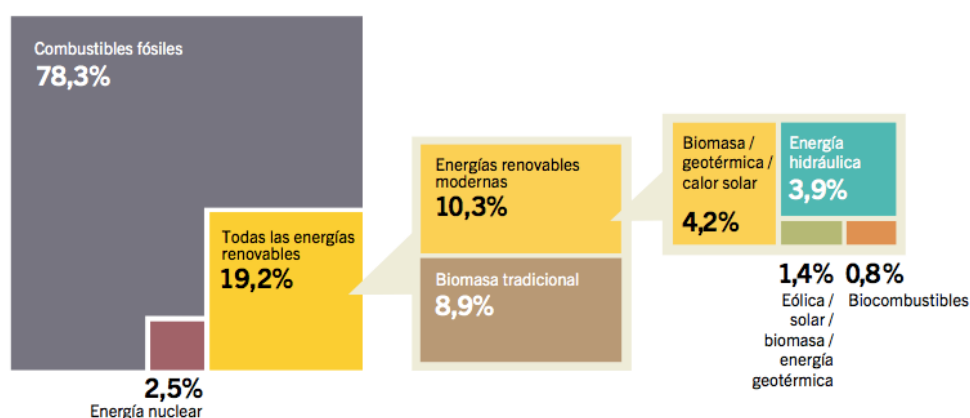
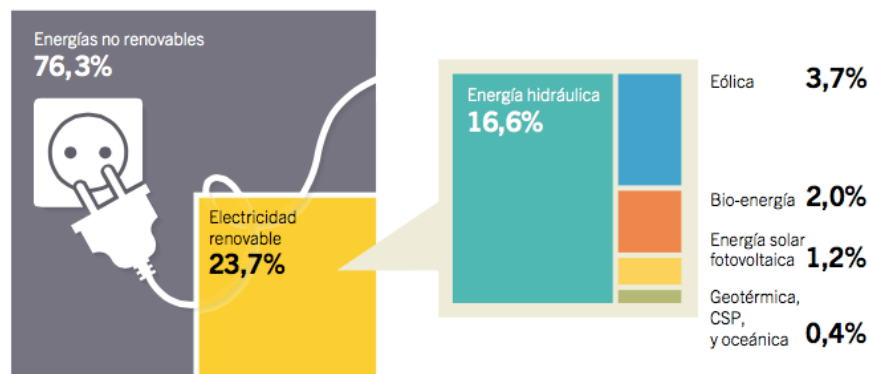


Figura 6: Porcentaje de cobertura de las EERR en relación al consumo mundial de energía primaria [13]

Se puede apreciar que un 19.2% del consumo final de energía mundial esta ocupado por las energías renovables, de las cuales un 8.9% esta asociado a la biomasa tradicional (en el contexto energético, la biomasa puede considerarse como la materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía. Estos recursos biomásicos pueden agruparse de forma general en agrícolas y forestales), cuyos usos serán la calefacción y cocina. [14]

El 10.3% se asocia a las “energías renovables modernas”, dentro de las cuales podemos hacer una clasificación en usos de generación de energía, eléctrica, calefacción/climatización, transporte y servicios.

Participación estimada de energía renovable en la producción de electricidad a nivel mundial, finales de 2015



Basado en la capacidad de generación de energía renovable a finales de 2015. Los porcentajes no corresponden a la suma total debido al redondeo.

Figura 7: Porcentaje de cobertura de las EERR en relación a la producción de electricidad a nivel mundial [13]

Si en vez de hablar de energía primaria y nos centramos en la participación de la energía renovable en la producción de electricidad, vemos que los porcentajes son parecidos en cuanto al reparto entre los combustibles fósiles y las energías renovables, aunque en este ultimo caso este aumenta un poco. Lo que mas llama la atención dentro del 23.7% de las energías renovables es que ahora un 16.6% proviene de la energía hidráulica, con aportaciones menores de la energía eólica, solar y fotovoltaica.

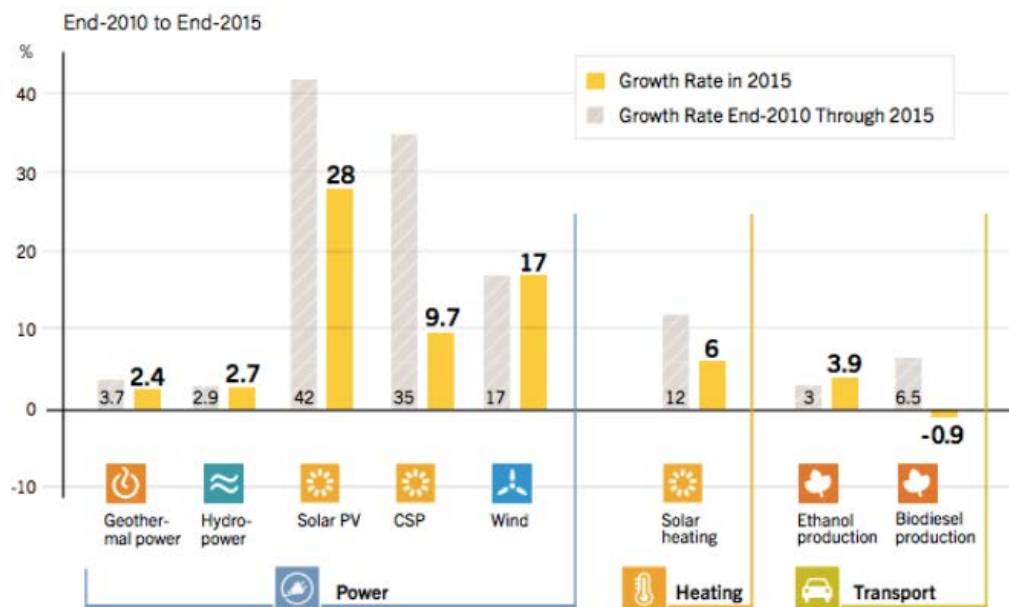


Figura 8: Porcentaje de crecimiento de las diferentes EERR y de producción de biocombustible [13]

En esta figura vemos la tasa de crecimiento de las diferentes energías renovables y nos aporta información sobre la relevancia y la madurez tecnológica de cada una de ellas.

De la grafica resaltan los datos referidos a la energía solar fotovoltaica y a la solar de concentración (CSP, *Concetration Solar Power*) ya que sus tasas de crecimiento son las mayores, esto se debe a que estas tecnologías están llegando a un grado de madurez alto. También vemos que la energía eólica presenta un crecimiento mas suave.

A continuación mostraremos los principales países en el contexto mundial (datos a finales de 2015):

Capacidad o generación total al final de 2015

	1	2	3	4	5
ELECTRICIDAD					
Electricidad renovable (incl. hidráulica)	China	Estados Unidos	Brasil	Alemania	Canadá
Energía renovable (hidráulica no incl.)	China	Estados Unidos	Alemania	Japón	India
Capacidad de energía renovable <i>per capita</i> (sin incl. hidráulica ³ , entre los 20 líderes)	Dinamarca	Alemania	Suecia	España	Portugal
🔌 Generación de bioenergía	Estados Unidos	China	Alemania	Brasil	Japón
🔌 Capacidad de energía geotérmica	Estados Unidos	Filipinas	Indonesia	México	Nueva Zelanda
💧 Capacidad de energía hidráulica ⁴	China	Brasil	Estados Unidos	Canadá	Rusia
💧 Generación de energía hidráulica ⁴	China	Brasil	Canadá	Estados Unidos	Rusia
☀️ Energía solar térmica de concentración (CSP)	España	Estados Unidos	India	Marruecos	Sudáfrica
☀️ Capacidad solar FV	China	Alemania	Japón	Estados Unidos	Italia
☀️ Capacidad solar FV <i>per capita</i>	Alemania	Italia	Bélgica	Japón	Grecia
💨 Capacidad de energía eólica	China	Estados Unidos	Alemania	India	España
💨 Capacidad de energía eólica <i>per capita</i>	Dinamarca	Suecia	Alemania	Irlanda	España
CALOR					
☀️ Capacidad del captador solar de agua ⁵	China	Estados Unidos	Alemania	Turquía	Brasil
☀️ Capacidad de calentamiento del captador solar de agua <i>per capita</i> ⁵	Austria	Chipre	Israel	Barbados	Grecia
🔌 Capacidad de calor geotérmico ⁶	China	Turquía	Japón	Islandia	India
🔌 Capacidad de calor geotérmico <i>per capita</i> ⁶	Islandia	Neuva Zelanda	Hungría	Turquía	Japón

Figura 9: 5 primeros países en capacidad o generación para las diferentes tecnologías [13]

De la tabla puede deducirse que los principales países a nivel mundial en las diferentes tecnologías ya que ocupan las dos primeras posiciones son China y Estados Unidos, hay que tener en cuenta que son países con una gran población y extensión geográfica.

Si analizásemos la capacidad per capita (por número de habitante) nos damos cuenta que las primeras posiciones están ocupadas por países europeos, estando España en cuarta posición.

Atendiendo a las capacidades de energía renovable (la energía hidráulica esta excluida en este estudio) instalada en mundo, Unión Europea (UE-28), países BRICS y los 7 países líderes:

Capacidades de energía renovable en el mundo, UE-28, BRICS y los siete países líderes, finales de 2015

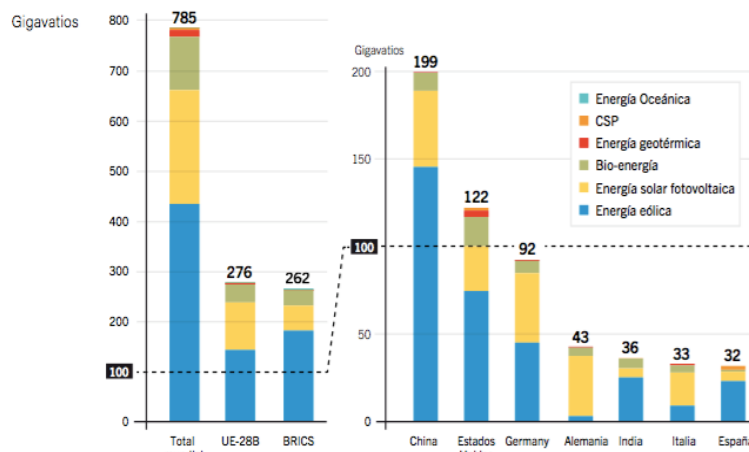


Figura 10: Capacidades de energía renovable instalada en el mundo, Unión Europea (UE-28), BRICS y los 7 países líderes [13]

Al igual que en la anterior tabla los 2 primeros países líderes son China y Estados Unidos, seguidos de Alemania, Japón, India, Italia y España. También vemos que las dos tecnologías mas utilizadas son la energía eólica y la energía solar fotovoltaica.

A continuación analizaremos estas 2 tecnologías:

□ Energía eólica

Capacidad y adiciones anuales mundiales de energía eólica, 2005-2015

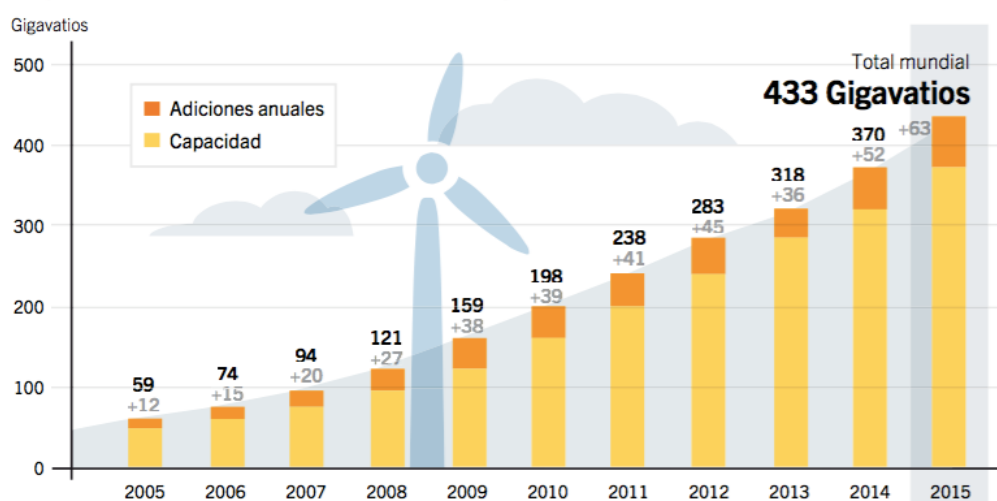


Figura 11: Evolución de la capacidad eólica instalada desde 2005 a 2015 [13]

Capacidad y adiciones de energía eólica, 10 países líderes, 2015

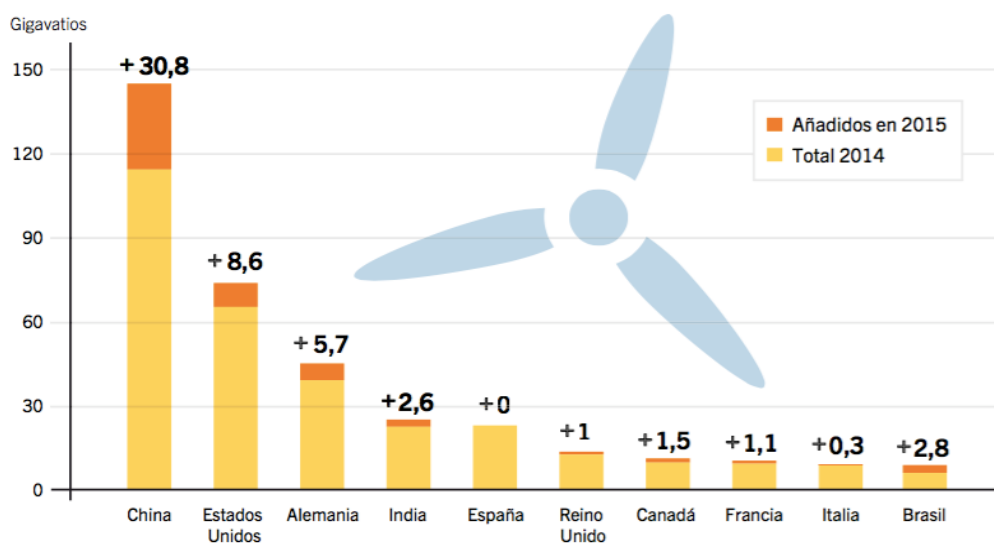


Figura 12: Incremento de la capacidad eólica de los 10 países líderes [13]

Como vemos en la figura 11, el crecimiento en los últimos 10 años ha sido muy reseñable con incrementos significativos de la capacidad total.

Observando la figura 12 vemos como de nuevo China y Estados Unidos lideran este sector, y como algo significativo España esta situada en la quinta posición pero en el ultimo año no aumentó su capacidad eólica.

□ Energía solar fotovoltaica

Capacidad y adiciones anuales de energía solar FV, 2005-2015

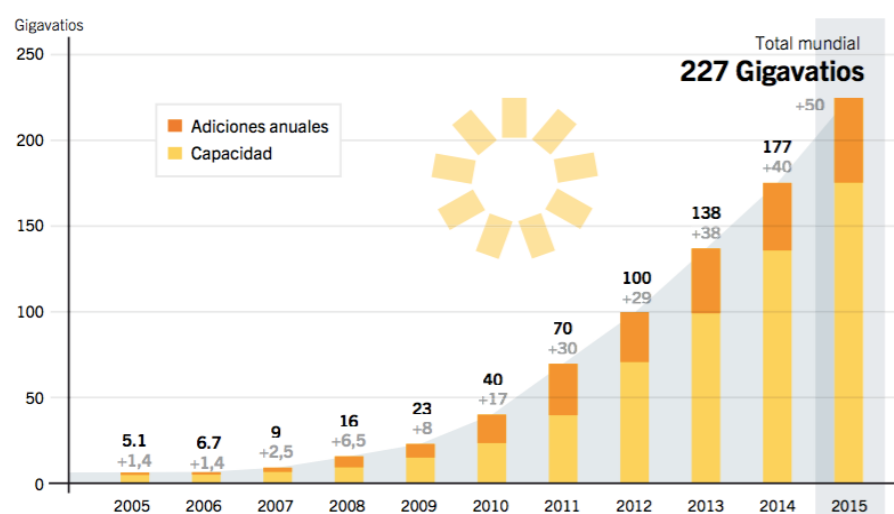


Figura 13: Evolución de la capacidad solar fotovoltaica instalada desde 2005 a 2015 [13]

Capacidad y adiciones de energía solar FV, diez países líderes, 2015

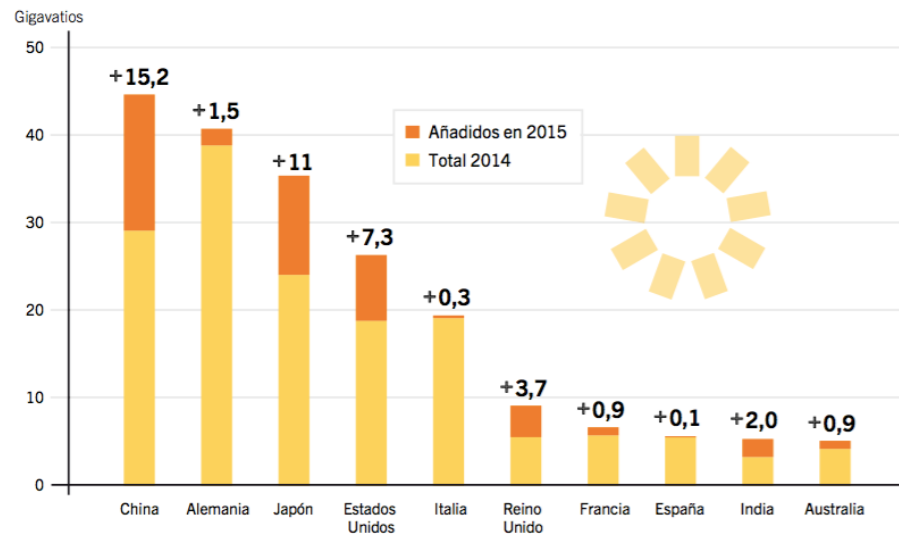


Figura 14: Incremento de la capacidad solar fotovoltaica de los 10 países líderes [13]

Observamos como en la figura 13, la evolución de las instalaciones fotovoltaicas ha tenido un fuerte crecimiento en los últimos 10 años.

En la figura 14, vemos que los países líderes en este sector son China, Alemania, Japón, Estados Unidos e Italia. También puede apreciarse que los países que experimentan mayor crecimiento en el ultimo año son China, Japón y Estados Unidos mientras que España es el país que menos crece entre los 10 países líderes.

2.6. Panorama actual: EERR en España

En España, el IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) es el encargado de las políticas relacionadas con las EERR. El marco estratégico de su actividades es contribuir la consecución de los objetivos que tiene adquiridos nuestro país en materia de mejora de la eficiencia energética, energías renovables y otras tecnologías bajas en carbón.[15]

En la actualidad el plan vigente es el Plan de Acción de Energías Renovables 2011-2020, que fija unos objetivos del 20% de aporte de energías renovables al consumo final bruto de energía y una contribución mínima del 10% de las energías renovables del sector transporte.

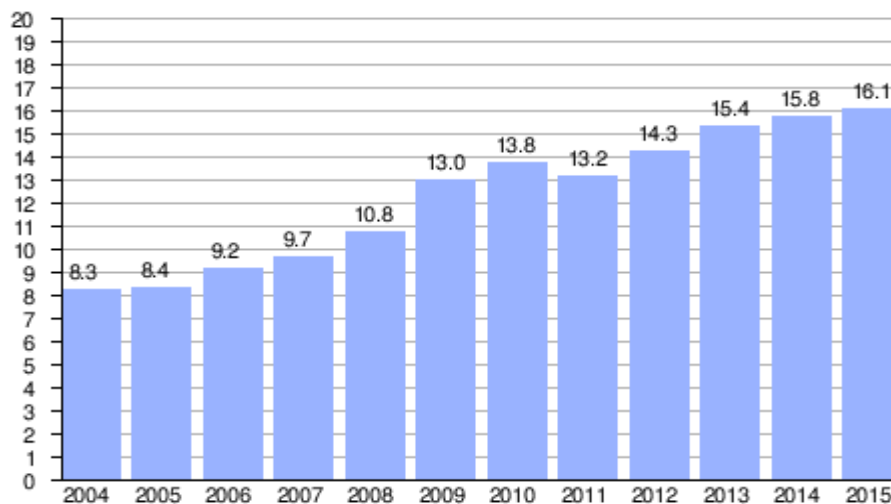


Figura 15: Evolución del porcentaje de cobertura del consumo final bruto de las energías renovables [16]

Según observamos la figura 15, viendo la evolución del porcentaje ha sido positiva, sin embargo en los últimos 3 años se ha estancado y no se sabe si para el 2020 se llegará a ese 20% fijado por el Plan de Acción de Energías Renovables.

Las siguientes graficas muestran el consumo de energía primaria y el consumo de la energía final en España en el año 2014:

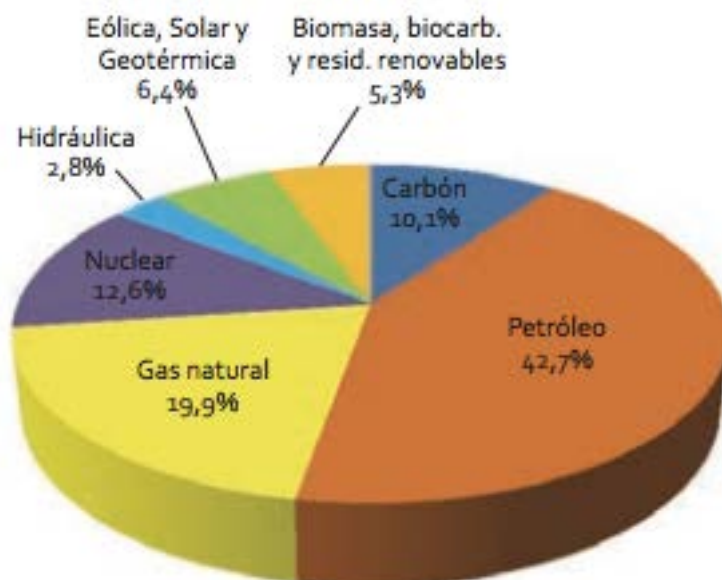


Figura 16: Consumo energía primaria en España en 2014 (sin incluir saldo eléctrico) [17]

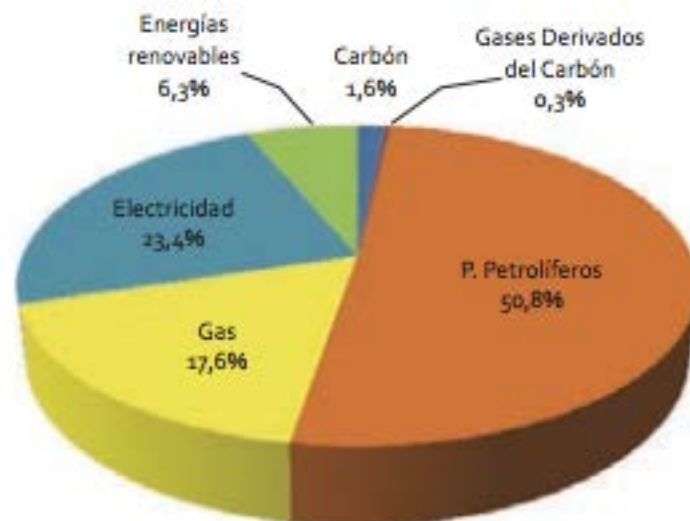


Figura 17: Consumo energía final en España en 2014 [17]

Como se aprecia la situación es muy similar a la del contexto global, con una dependencia de los combustibles fósiles entorno al 75% del consumo de energía primaria.

Resulta contradictorio que en la figura 15 en valor de las EERR a año 2014 sea de un 15.8% y en la figura 17 sea de un 6.3% pero esto es porque en la figura 17 no se sumado el 40% de la producción de energía eléctrica que proviene de las fuentes renovables.

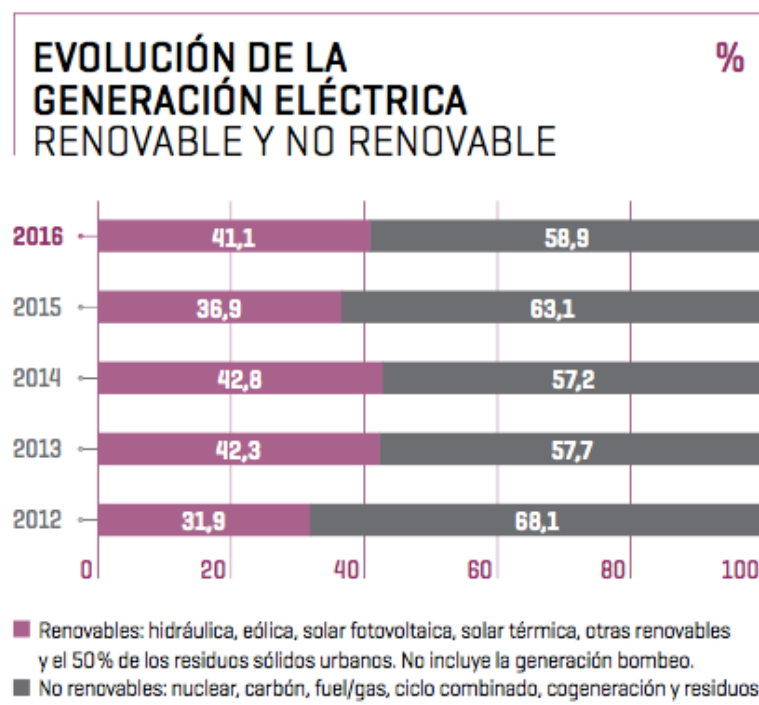


Figura 18: Evolución de la producción de energía eléctrica renovable y no renovable en España [18]

Si nos centramos en la generación de energía eléctrica en nuestro país vemos que la contribución de las energías renovables es de un 41.1%, pero lo mas significativo es que en los años 2013 con un 42.3% y en 2014 con un 42.8% se supera al año 2016, esto lo resolveremos con la siguiente figura.

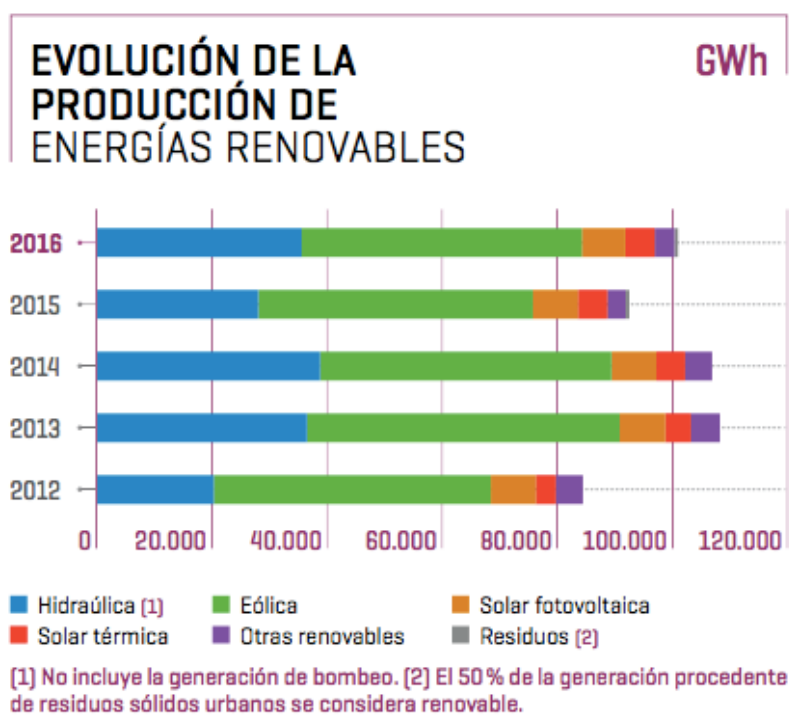


Figura 19: Evolución de la producción de energía renovable en España [18]

La situación anterior, a la vista de la figura 19, puede aclararse como que en los años 2013 y 2014 hay un aumento de la energía hidráulica, probablemente por una mayor cantidad de precipitaciones.

2.7. Ventajas y desventajas de las EERR

Según lo analizado anteriormente podremos establecer una serie de ventajas y desventajas que nos proporcionan las energías renovables.

□ Ventajas

- 1) Son respetuosas con el medio ambiente y representan la alternativa de energía más limpia hasta el momento. tienen mínimos impactos sobre el medio ambiente, sin productos de desecho, emisiones de CO₂ y otros tóxicos, como ocurre con las fuentes tradicionales de energía. Los beneficios medioambientales de las energías renovables son muchos, y sobretodo contribuirán a mejorar los niveles de contaminación atmosférica.
- 2) Se trata de fuentes de energía que son virtualmente inagotables. Las energías renovables contribuyen a reducir nuestra dependencia sobre los combustibles fósiles, y con ello, de la dependencia del abastecimiento desde terceros países.
- 3) Aporta beneficios económicos. La energía renovable cada vez es más competitiva frente a otras fuentes de energía convencionales. Además, se crean miles de puestos de trabajo tanto en fabricación, como en instalación, mantenimiento y comercialización, que contribuyen en gran manera a la economía del país.
- 4) Estabilizan los precios de la energía, como gran parte de la energía producida proviene de fuentes no renovables, el coste final de la energía para el consumidor experimenta subidas periódicas. Con una producción estable y asentada basada en energías renovables, el precio no sufriría tantos altibajos.
- 5) Son fáciles de dismantelar y no requieren custodiar sus residuos durante millones de años, como ocurre por ejemplo con las energías nucleares.

□ Desventajas

- 1) La inversión inicial que supone un gran desembolso inicial y una amortización quizás más larga de lo deseable por el inversor/usuario..
- 2) Algunas personas encuentran un inconveniente en estas energías, el hecho de que dependiendo de su fuente necesitan de un gran espacio para poder desarrollarse, o necesitaremos disponer de un gran sistema para que surja algún efecto (es el caso por ejemplo de los paneles solares, de los que necesitaremos una cantidad considerable si queremos generar una alta energía eléctrica).
- 3) Resulta difícil producirla grandes cantidades. Cuando pensamos en las centrales térmicas o nucleares y en la cantidad de energía que logran producir, parece difícil pensar en un 100% de abastecimiento a base fuentes renovables. Con total seguridad necesitamos implantar nuevas plantas productoras para que se logre cubrir la creciente demanda.
- 4) La disponibilidad en el sentido de que la mayoría de las fuentes de energías renovables sufren altibajos en función del tiempo meteorológico (sol, viento, lluvia...). Si no se dan las condiciones adecuadas, no se produce energía. Por ello, es difícil asegurar una generación de energía constante o por ejemplo, asegurar la cobertura de los picos de demanda energética y se debe esperar que haya suficiente almacenamiento. Esto ultimo lo trataremos en el siguiente capitulo con mas detenimiento.

3. ALMACENAMIENTO DE ENERGIA EN LA RED ELECTRICA

3.1. Introducción

El primer concepto que definiremos será el de almacenamiento de energía: son métodos que utiliza la humanidad para conservar la energía en cualquier forma y poder liberarla cuando sea requerida, ya sea de forma energética o en otra diferente. Esta energía puede ser potencial (química, gravitacional, elástica, etc.) o cinética.[19]

La energía eléctrica puede ser generada, transportada y transformada con facilidad, sin embargo almacenarla en grandes cantidades resulta complicado.

Existen diferentes tipos de almacenamiento según su capacidad: [20]

- ☐ Almacenamiento a gran escala (GW): hidroeléctrica reversible (bombeo), almacenamiento térmico.
- ☐ Almacenamiento en redes (MW): pilas y baterías, condensadores y superconductores, volantes de inercia. [19]
- ☐ Almacenamiento para consumidor final (kW): baterías, superconductores, volantes de inercia.

3.2. Factores esenciales en el almacenamiento de energía

Existen 2 factores esenciales en el almacenamiento de energía (en el siguiente punto los desarrollaremos más detenidamente):

- ☐ Aplanamiento de la curva de demanda, hay que intentar reducir las enormes diferencias de la curva, aplanando la curva se consigue una mayor calidad en el suministro y una mayor estabilidad, lo que aumenta su eficiencia.
- ☐ Integración en fuentes de energía renovables, al tener las energías renovables una producción intermitente y de difícil previsión, se necesita almacenar esa energía descompensada con la demanda.

3.2.1. Curva de demanda

En España la encargada del sistema eléctrico es Red Eléctrica de España (REE), gracias a ella se garantiza en todo momento la seguridad y la continuidad del suministro eléctrico de toda la península, así como Canarias, Baleares, Ceuta y Melilla. [21]

Como aun no existen tecnologías que permitan el almacenamiento de grandes cantidades de energía en la red eléctrica, es indispensable que hay un equilibrio entre la generación y la demanda de energía en tiempo real. REE se encarga de realizar una previsión de la demanda y una posterior monitorización en tiempo real de generación y transporte con el fin de asegurar que exista ese equilibrio en cada momento.

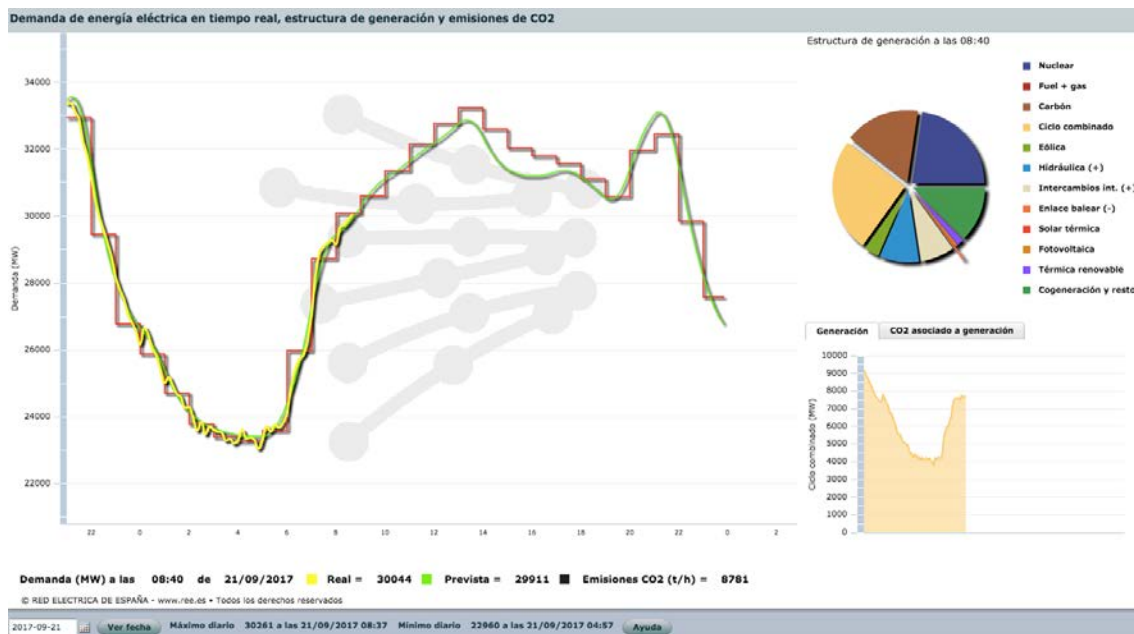


Figura 20: Curva de generación y demanda en tiempo real en el sistema eléctrico español [22]

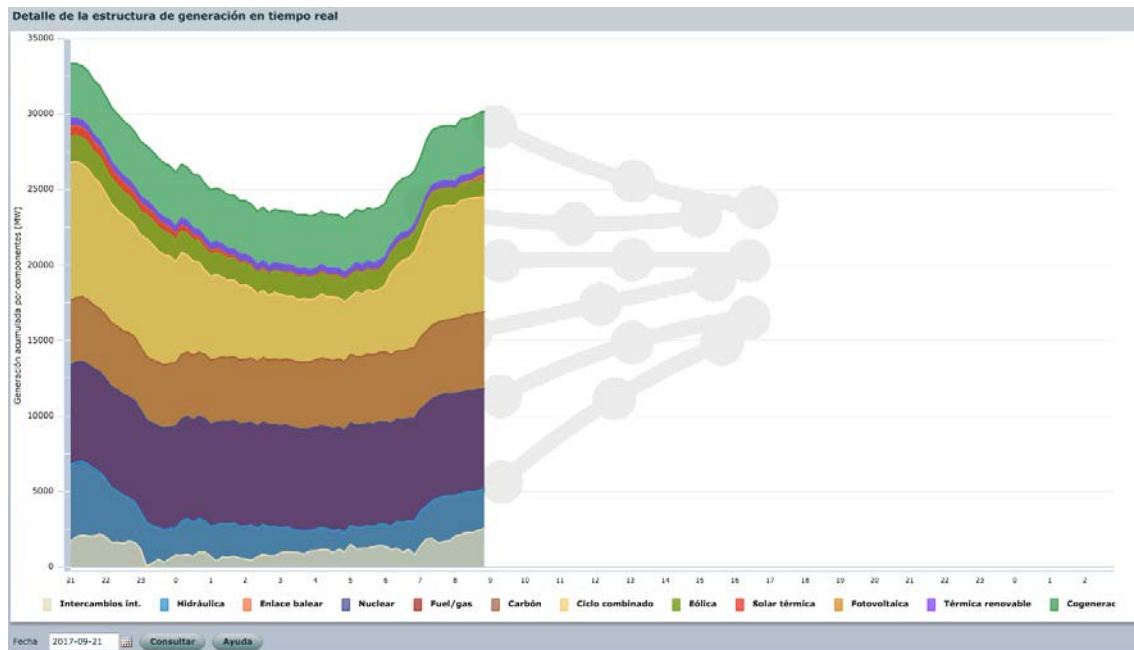


Figura 21: Detalle de la estructura de generación en tiempo real del sistema eléctrico español [22]

En la figura 20 observamos dos picos de demanda durante el día (sobre las 13:30 y sobre las 21h), debido principalmente a la actividad industrial y al sector servicios, mientras que durante la noche vemos que hay un periodo donde el consumo se reduce considerablemente, esto es lo que se denomina valle de energía.

En la figura 21 observamos que a las 9am las energías que están mas presentes son energía de ciclo combinado con un 25% (se trata de electricidad que se genera a través de la energía térmica del combustible, mediante dos ciclos termodinámicos) y la energía nuclear con un 22.6%. La primera energía renovable seria la hidráulica con un 9%.

Tanto la figura 20 como la figura 21 son un ejemplo para un día concreto, la situación cambiará de un día a otro en función de si hay más o menos sol, viento, etc.

3.2.2. Integración en EERR

A día de hoy no existe ninguna tecnología madura que logre la acumulación de energía a gran escala en la red eléctrica (a excepción de la hidráulica de bombeo), este es el mayor problema de las energías renovables. A su vez debido a las fluctuaciones propias de ellas, pensemos en la energía eólica o solar por ser las tecnologías mas expuestas, lo ideal seria (en días de mucho viento o de calor) poder acumular toda la energía generada y poder utilizarla a posteriori. Pero uno de los principales problemas de estas EERR es su intermitencia, no podemos depender de un sistema basado en estas dos tecnologías y además tendríamos que adecuar a la red de transporte a los picos de generación que se produjesen.

Relacionado con este tema surge el concepto de *garantía de capacidad*, que se podría definir como la disponibilidad de una determinada tecnología de proporcionar la potencia instalada en un determinado momento.

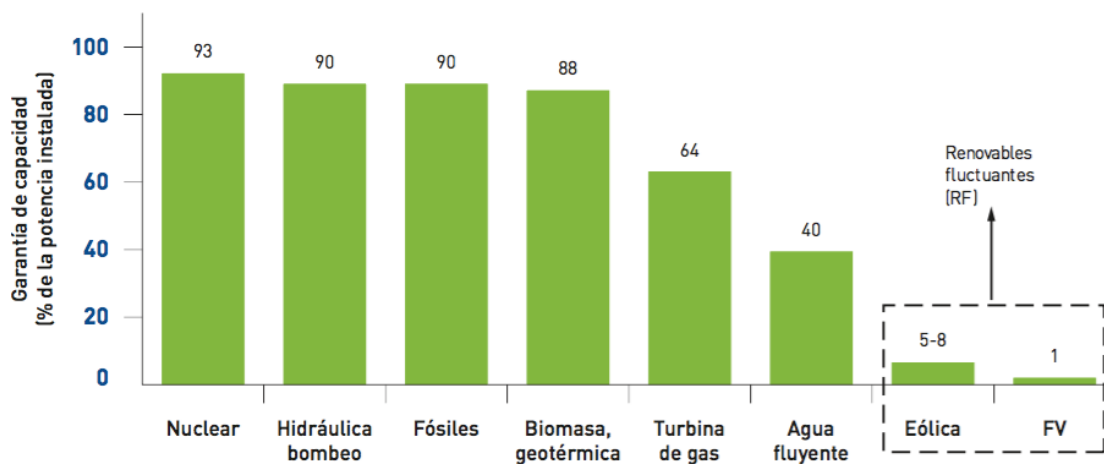


Figura 22: Garantía de capacidad asociada a diferentes tecnologías de generación eléctrica [2]

Como se aprecia en la figura 22, los datos mas relevantes son que las centrales nucleares y de combustibles tienen una garantía de capacidad mayor del 90% de la potencia instalada, y que las energías renovables fluctuantes tienen un 5-8% en el caso de la eólica y un 1% en el caso de la fotovoltaica. Esto ultimo implica que no se puede asegurar una sustitución de las energías basadas en combustibles fósiles por energías renovables fluctuantes.

Esta limitación trae consigo que tengamos que mantener un parque convencional con elevada garantía de capacidad y que a su vez se establezcan parques de energía renovables que puedan sustituir con seguridad a las centrales eléctricas.

3.3. Tecnologías de almacenamiento

Bajo la premisa de que si la energía de las renovables fluctuantes no se necesita directamente en el momento de la producción, sino que se almacena para su posterior consumo, se están desarrollando un conjunto de tecnologías de almacenamiento que se basan en una serie de principios mecánicos, térmicos, electroquímicos o electromagnéticos, como podemos observar en la figura 23.

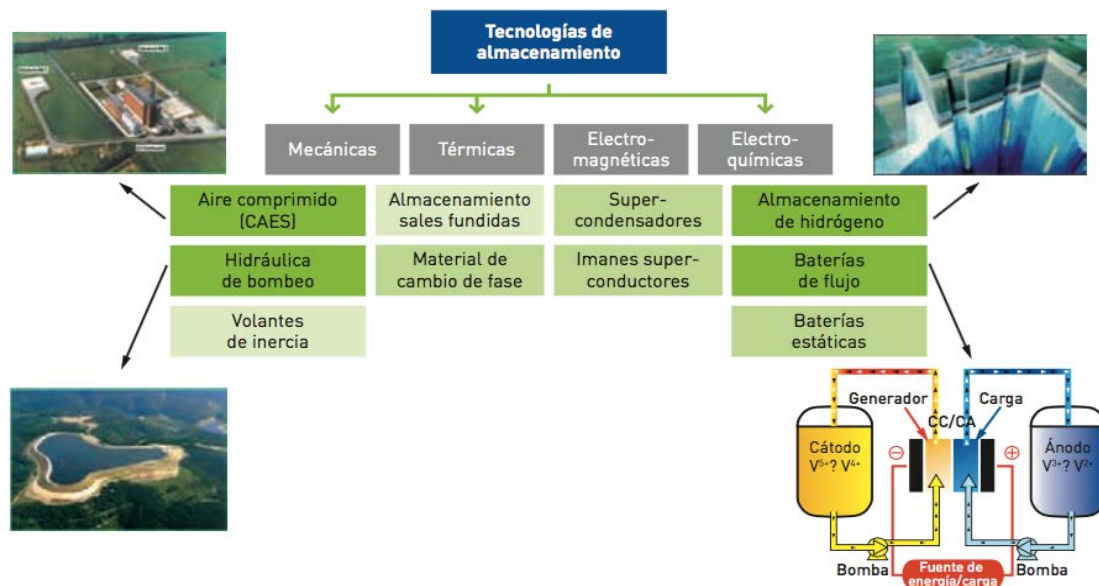


Figura 23: Tecnologías de almacenamiento en la red eléctrica [2]

3.3.1. Almacenamiento mecánico

3.3.1.1. Aire comprimido

El almacenamiento de energía mediante aire comprimido o CAES (*Compressed Air Energy Storage*) se aprovecha el uso del aire comprimido para el almacenamiento de energía. Consiste en almacenar aire a altas presiones bajo tierra, que suelen ser antiguas minas, pozos petrolíferos o de gas natural o acuíferos, lo cual permite un almacenaje de aire masivo y sin los enormes costes que supondrían la realización del cubículo subterráneo.

Dicho aire se presurizará de forma progresiva con enfriamientos intermedios en el proceso para lograr un mayor rendimiento de energía en periodos donde se posea energía excedente. La compresión de aire se realizará normalmente en las horas de bajo consumo (horas valle) para después producir energía en las horas pico.

El sistema se compone principalmente de:

- Un motor/generador para comprimir y descomprimir el aire.
- El recuperador, el tren de turbinas y turbinas de baja y alta presión.
- Equipos de control.
- Equipos auxiliares.

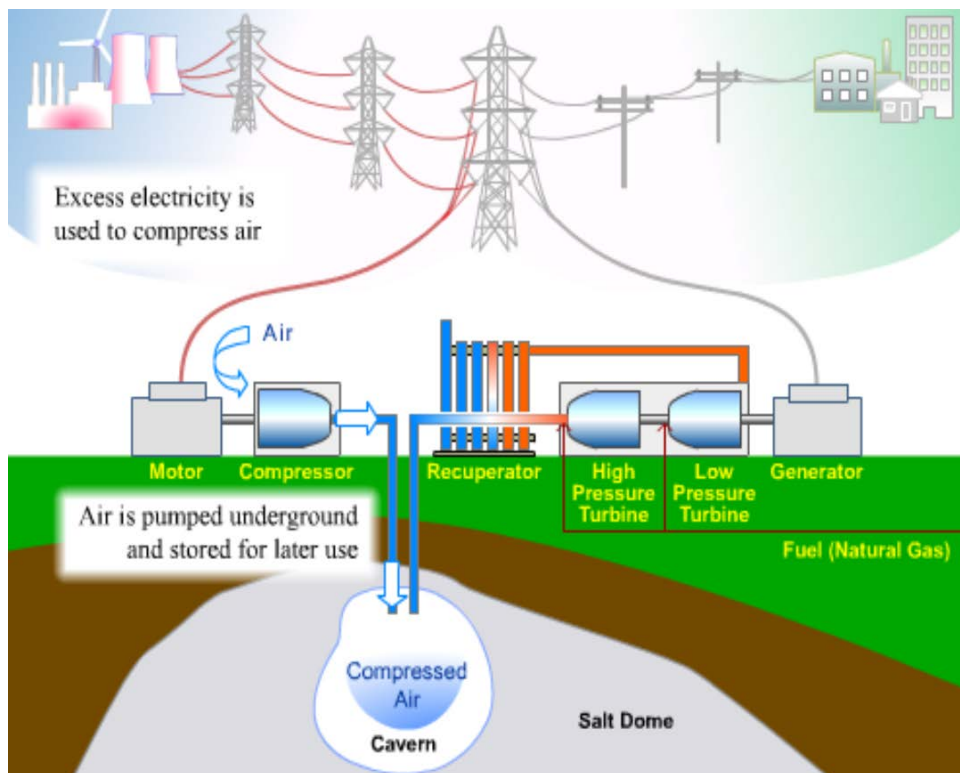


Figura 24: Esquema almacenamiento energía mediante aire comprimido [25]

Permiten el almacenamiento de energía a gran escala, incluso hasta los 1.000 MW, y por largos periodos de tiempo (más de un año), sin repercutir en pérdidas considerables.

El almacenamiento de energía mediante aire comprimido se realiza a través de la manipulación del calor del sistema en tres formas:

□ Almacenamiento adiabático: el calor originado puede quedar almacenado en el propio aire comprimido o en otro medio de almacenamiento de calor como pueden ser sales fundidas para, posteriormente, ser devuelto al aire antes de su expansión en la turbina. La eficiencia del almacenamiento será mayor cuanto mayor sea la capacidad para aprovechar este calor durante la expansión, llegando normalmente a valores del 70%.

□ Almacenamiento diabático: el calor se disipa a la atmósfera mediante una enfriadora. El calor extra que se requiere para la expansión se obtiene mediante la quema de algún combustible. Es un sistema de almacenamiento híbrido. A pesar de que su eficiencia es consecuentemente menor, en torno a un 40-55%- y los costes energéticos mayores que los de la tecnología anterior, es la única tecnología que ha sido llevada a la práctica comercialmente.

□ Almacenamiento isoterma: la compresión y expansión del aire se realizan a temperatura constante gracias a que se intercambia calor con el ambiente. Esto llevaría al sistema a eficiencias del 100%, sin embargo, como las pérdidas de calor son inevitables, este sistema es inalcanzable.

Sólo existen dos plantas de almacenamiento energético por aire comprimido a nivel comercial en el mundo, una en Alemania y otra en Estados Unidos.

En un futuro es posible que este tipo de almacenamiento tenga potencial, gracias a su capacidad de almacenamiento de energía de forma masiva lo cual siempre reduce los costes. El almacenamiento de aire comprimido puede tener un enfoque modular, lo que puede ser muy beneficioso si se combina con las estaciones de producción de energía (como por ejemplo la generación eólica), aumentando así la eficiencia de los mismos.

Se están investigando diferentes mecanismos, componentes diversos y recursos naturales diversos para reducir el costo total provocado por el inconveniente geográfico que posee. Además se están probando diferentes cámaras, subterráneas y terrestres, para determinar su almacenamiento.

Resumen:

- ☐ Beneficioso al combinarlo con fuentes de energía renovables (ej. eólica, solar).
- ☐ Posibilidad de almacenamiento masivo.
- ☐ El coste es rentable a corto y largo plazo.
- ☐ Alta velocidad de respuesta.
- ☐ El almacenamiento está limitado a la situación geográfica.
- ☐ En las turbinas de gas se generan emisiones de CO₂.
- ☐ Pérdidas entre 20-50% en funcionamiento normal.
- ☐ Es una tecnología no madura.

3.3.1.2. Hidráulica de bombeo

El almacenamiento de energía mediante el bombeo hidráulico es un sistema muy desarrollado y utilizado para producción de energía a gran escala, Se combina fácilmente con sistemas eólicos, donde la energía sobrante se utiliza para revertir el agua. Para que funcione como un sistema de almacenamiento se devuelve el agua a una presa superior donde queda almacenada, y gracias a su posterior caída moverá una turbina conectada a un generador con el cual se generará electricidad.

La variabilidad de almacenamiento interanualmente es alta, ya que depende del clima y es necesario tener unas reservas mínimas para el almacenamiento.

La central hidroeléctrica de bombeo se compone de:

- ☐ Embalse superior
- ☐ Presa
- ☐ Galería de conducción
- ☐ Chimenea de equilibrio
- ☐ Tubería Forzada
- ☐ Turbinas

- ☐ Generador
- ☐ Transformadores
- ☐ Desagües
- ☐ Línea de transporte de energía eléctrica
- ☐ Embalse inferior o río



Figura 25: Esquema central hidroeléctrica de bombeo [31]

Durante las horas en que la demanda de energía eléctrica es mayor, la central de bombeo funciona como cualquier central hidroeléctrica convencional: el agua que previamente es acumulada en el embalse superior (1) cerrado por una presa (2), llega a través de una galería de conducción (3) a una tubería forzada (5), que la conduce hasta la sala de máquinas de la central eléctrica. Para la regulación de las presiones del agua entre las conducciones anteriores se construye en ocasiones una chimenea de equilibrio (4).

En la tubería forzada, el agua va adquiriendo energía cinética (velocidad) que, al llegar de la turbina hidráulica (6), se convierte en energía mecánica rotatoria. Esta energía se transmite al generador (7) para su transformación en electricidad de media tensión y alta intensidad. Una vez elevada su tensión en los transformadores (8) es enviada a la red general mediante líneas de transporte de alta tensión (10). El agua, una vez que ha generado la electricidad, circula por el canal de desagüe (9) hasta el embalse inferior (11), donde queda almacenada.

Cuando se registra un menor consumo de energía eléctrica (generalmente durante las horas nocturnas de los días laborables y los fines de semana), se aprovecha el que la electricidad en esas horas tiene en el mercado un coste bajo, y se utiliza para accionar

una bomba hidráulica que eleva el agua desde el embalse inferior (11) hasta el embalse superior (1), a través de la tubería forzada y de la galería de conducción.

El agua es elevada, generalmente por las propias turbinas de la central, funcionando como bombas accionadas por los generadores que actúan como motores. Una vez efectuada la operación de bombeo, el agua almacenada en el embalse superior (1) está en condiciones de repetir otra vez el ciclo de generación eléctrica

Existen dos tipos de centrales hidroeléctricas:

- ☐ De bombeo puro: el agua procedente de la presa inferior ha de ser bombeada previamente a la superior para poder producir electricidad. [L]
[SEP]
- ☐ De bombeo mixto: es posible producir electricidad sin el bombeo previo a la presa. Su funcionamiento es equivalente a una central tradicional, exceptuando a que puede almacenar energía bombeando agua a la presa superior desde la inferior.

España cuenta en la actualidad con cerca de 800 centrales hidroeléctricas, con un rango de tamaño muy variado. Las 20 centrales de más de 200 MW representan en conjunto el 50% de la potencia hidroeléctrica total instalada. En el otro extremo, existen centenares de pequeñas instalaciones con potencias menores de 20 MW.

Resumen:

Las ventajas más importantes son:

- ☐ Rendimientos 72-80%.
- ☐ Forma más rentable, en términos económicos, de almacenamiento.
- ☐ Larga vida.
- ☐ Bajo mantenimiento.
- ☐ Tecnología madura.

Inconvenientes:

- ☐ Son necesarios al menos 100m de desnivel entre ambas presas.
- ☐ Muy alta inversión inicial.
- ☐ Dificultad de emplazamiento. Depende completamente de la geografía.
- ☐ Ubicadas en lugares aislados, lo que implica un coste en las redes de

distribución y transporte.

- Producen un gran impacto ambiental.

3.3.1.3. Volantes de inercia

El volante de inercia (*flywheel energy storage*) es un elemento capaz de almacenar la energía en forma de cinética mediante una rotación, la cual será liberada en el momento que sea necesario.

Un sistema de almacenamiento basado en volantes de energía tendría:

- Volante de inercia
- Máquina eléctrica (generador/motor)
- Convertidores AD/DC y DC/AC
- Electrónica de control
- Rodamientos
- Carcasa

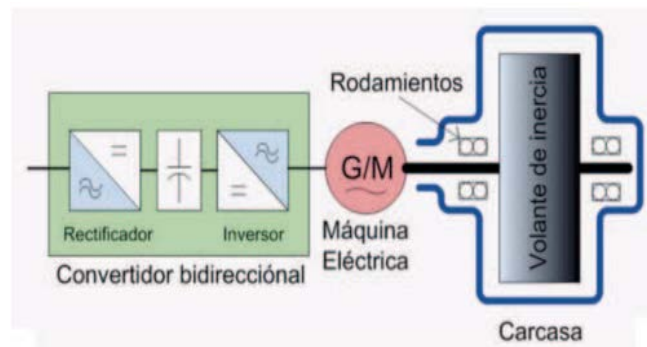


Figura 26: Esquema de elementos de un volante de energía [33]

Los volantes se cargan y descargan gracias a la acción de una máquina eléctrica que actúa como motor o generador y gracias a esta máquina y utilizando la energía proporcionada por la red eléctrica provocamos el movimiento del rotor del volante hasta alcanzar su velocidad nominal (proceso de carga). Después la energía mecánica almacenada se transformará en el momento de su utilización a energía eléctrica mediante el generador, disminuyendo en el proceso la velocidad del rotor del volante hasta su valor mínimo de diseño. Acto seguido se transformará a corriente alterna mediante un inversor y un sistema de control se encargará de controlar los valores de utilización. Además existe un máximo de energía que podemos almacenar, la cual estará

condicionada a la resistencia a la tracción del material con el que esté construido el volante.

Existen dos tipos de volantes de inercia en base a su velocidad:

- Volante de inercia a bajas velocidades, rango de velocidad $<6 \cdot 10^3$ rpm. Su principal uso es en aplicaciones de calidad de energía (regulación de frecuencia, sistemas híbridos y sistemas de alimentación ininterrumpida).
- Volantes de inercia a altas velocidades, rango de velocidad 10^4 - 10^5 rpm. Su principal uso es en aplicaciones de la industria del transporte (vehículos híbridos y catenarias de trenes) e industria aeroespacial (satélites y catapultas en portaviones).

Existen dos clases de volantes de inercia en base a su composición:

- Rotor de composite avanzado, como grafito o fibra de carbono. Estos son los más avanzados y tienen un precio mucho mayor. Estos materiales son muy resistentes a esfuerzos mecánicos y poseen baja densidad, lo que los hace idóneos para esta función.
- Rotor de acero. Este modelo tradicional puede ser utilizado para bajas velocidades con grandes diámetros, bajas potencias y densidad de energía, además de volantes para altas prestaciones, por lo que es muy versátil. Se debe trabajar con aceros poco densos y posee el riesgo de rotura (dispersión de fragmentos).

Actualmente se está investigando y desarrollando para ampliar el campo de utilización del volante de inercia en actividades comerciales.

En un futuro el volante de inercia puede ser un método viable de almacenamiento. Se están investigando nuevos materiales y nuevas formas de producción y mecanizado para que el volante tenga una eficiencia mayor con un coste menor. Se intenta suplir con ello el principal problema actual que tiene que es el escaso desarrollo tecnológico. Por otro lado, los volantes de inercia a pequeña escala están incrementando, gracias sobre todo a sus aplicaciones en transporte, debido al incremento de los coches eléctricos e híbridos en el mercado.

Resumen:

- ☐ Capacidad de descarga muy rápida.
- ☐ Adecuado a sistemas mecánicos con un ciclo energético no continuo.
- ☐ Mayor potencia energética entregada y absorbida que las baterías actuales (kW y MW).
- ☐ Su vida útil media es de 20 años, lo que triplica el de las baterías.
- ☐ El tiempo de almacenamiento de energía es limitado.
- ☐ Alto coste para volantes fabricados para altas velocidades.
- ☐ Elevada eficiencia energética (>85%)
- ☐ Tecnología no madura.

3.3.2. Almacenamiento térmico

Los sistemas de almacenamiento térmico tienen el potencial de incrementar el uso efectivo de la energía térmica y de facilitar el control de la producción térmica a gran escala. Suelen ser especialmente útiles para la corrección de la discordancia entre demanda y producción de energía.

Principalmente hay tres tipos de almacenamiento:

- ☐ Almacenamiento de calor sensible

Consiste en almacenar la energía que el material usado (sales fundidas) libera cuando su temperatura se reduce, al experimentar un cambio en su energía interna. Además de la densidad y del calor específico, existen otras propiedades que influyen en el almacenamiento de calor sensible, como son la temperatura de operación, la conductividad térmica, difusión, presión de vapor y por último es muy importante tener en cuenta los costes.

Los materiales usados para almacenar energía sensible se mantienen sin cambio de fase en el rango de temperaturas del proceso de almacenamiento y el calor almacenado puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$Q = \rho C_p V \Delta T$$

Siendo ρ , la densidad del material de almacenamiento, C_p el calor específico, V el volumen de material de almacenamiento utilizado y ΔT , el rango de temperatura.

Una gran variedad de fluidos han sido probados como materiales de almacenamiento, agua, aceites y sodio; destacando entre ellos, las sales fundidas. Su elección atiende a que son líquidas a presión atmosférica, presentan una excelente relación entre la capacidad de almacenamiento y el precio, sus temperaturas de operación son compatibles con las altas presiones y temperaturas en las turbinas de vapor, y no son inflamables ni tóxicas (a diferencia de los aceites sintéticos).

Sus principales aplicaciones son el almacenamiento de calor solar, centrales térmicas con turbinas de vapor y la climatización, siendo este último donde más extendida está su aplicación.

□ Almacenamiento de calor latente

Se basa en la energía almacenada en un cambio de fase, fusión o vaporización, mientras que en sentido inverso, con la solidificación o condensación se recupera la energía. Este método se caracteriza por tener siempre una temperatura constante.

Este método posee una densidad de energía mayor que el calor sensible. Otras ventajas destacables son que como la temperatura constante a lo largo del proceso, no tendremos variaciones de volumen, además de una extensa variabilidad en los materiales a utilizar y temperaturas de operación. Sin embargo, los materiales son más costosos que en calor sensible y es más complicado transmitir calor al medio.

Algunos de los posibles materiales a utilizar son denominados materiales de cambio de fase, los cuales necesitan gran cantidad de energía empleada con el fin de cambio de estado, manteniendo la temperatura en este punto constante. Las sales fundidas son uno de los ejemplos más avanzados de esto, utilizadas como sistema de almacenamiento.

Como principal aplicación tenemos la calefacción de viviendas, y no se aplica en producción de energía debido a que no existe un material que cumpla todos los requisitos para el proceso.

☐ Almacenamiento subterráneo de energía térmica

Sus siglas en inglés UTES (*Underground Thermal Energy Storage*), es una forma de almacenamiento energético, que ofrece posibilidades de ahorro energético y sinergia con la producción de fuentes de energía renovables.

Los anteriores tipos de almacenamiento se encontraban en la superficie y podían incluso transportarse. Sin embargo, es posible almacenar energía térmica de forma subterránea (frío o calor), debido a la alta capacidad calorífica del subsuelo y su buen aislamiento.

Nos permite almacenar la energía durante largos periodos de tiempo, alcanzando algunos meses.

Las aplicaciones principales son almacenamiento de energía y climatización.

Resumen:

- ☐ Sinergia con las fuentes de energía renovables.
- ☐ Rendimiento muy variable dependiendo del rango de temperaturas con el que ^[1]_[SEP] se trabaje, pero rondan el 80-90%.
- ☐ Multitud de materiales a elegir.
- ☐ Dependiendo del material y del aislamiento existirán pérdidas energéticas.
- ☐ Capacidad: hasta 1000MW.
- ☐ Tiempo de descarga: horas.
- ☐ Almacenamiento a largo plazo
- ☐ Alta ciclabilidad.
- ☐ Fácil emplazamiento en calor latente y sensible, moderado en subterráneo.
- ☐ Tecnología madura.

3.3.3. Almacenamiento electromagnético

3.3.3.1. Almacenamiento en ultracondensadores

Los condensadores electroquímicos o EDLC (*Electrochemical Double Layer Capacitors*) también son conocidos como supercondensadores. Los ultracondensadores son componentes electrónicos pasivos que permiten el almacenamiento de energía en pequeños periodos de tiempo.

El principio de funcionamiento en el que se basan los ultracondensadores es la pseudocapacitancia que es el almacenamiento de energía asociado a la acumulación de carga eléctrica entre las láminas del condensador gracias al medio aislante. Es un fenómeno que depende de la tensión, por lo que posee una capacitancia variable.



Figura 27: Grupo de ultracondensadores [41]

Su funcionamiento es el mismo que el de los condensadores tradicionales, el almacenamiento eléctrico gracias a campos eléctricos, se almacenan iones y no hay una transferencia de masa. Pero mientras que los condensadores tienen una capacidad del orden de mF, mientras que los ultracondensadores alcanzan magnitudes de 5000F.

El cambio principal frente a los condensadores consiste en acercar las cargas de distinta polaridad dentro del dispositivo a nivel molecular y además aumentar la superficie efectiva de los conductores.

Las características principales de estos dispositivos son:

- ☐ Densidad de energía: $\sim 20\text{-}100 \text{ Wh/Kg}$
- ☐ Densidad de potencia: $\sim 20\text{-}200 \text{ W/kg}$
- ☐ Rango de energía: para sistemas de hasta 100MWh
- ☐ Rango de potencia: $\sim 1\text{kW}\text{-}30\text{MW}$
- ☐ Tiempos de carga y descarga: $\sim \text{horas}$

- Número de ciclos de carga y descarga: 1000 - 3000
- Rendimiento: 75% – 99% según tecnologías
- Autodescarga: 0 – 20 % al mes según tecnologías
- Precios bajos para Pb-ácido, medios para Ni-Cd y caros para Li-ión
- Según tipo puede poseer elementos tóxicos

La cantidad de energía almacenada es:

$$E = \frac{1}{2} CV^2$$

siendo: E = Energía almacenada [J], C = Capacidad [F], V = Tensión de continua máx. que soporta [V]

La capacidad del EDLC, al igual que de un condensador, es proporcional a la superficie de los electrodos y a la permisividad dieléctrica del medio e inversamente proporcional a la distancia entre los electrodos.

Las propiedades del ultracondensador están basadas en el circuito equivalente como vemos en la imagen:

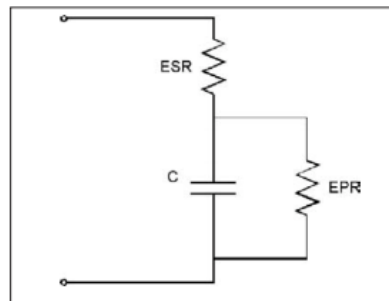


Figura 28: Circuito equivalente de un ultracondensador [39]

Como se observa en la figura 28, existe una resistencia equivalente en serie (ESR), la cual representa las pérdidas del dispositivo cuando conduce, y una resistencia equivalente en paralelo (EPR), que representa las pérdidas por corrientes de fuga. Ambas son muy pequeñas, del orden de 1-10mΩ y 1-10mA respectivamente. Siendo esto así, se alcanzan rendimientos por encima del 95%.

A continuación, en la siguiente figura es representado un ciclo típico de carga y descarga de un ultracondensador. Como se aprecia es muy similar a la de carga y descarga de un condensador tradicional.

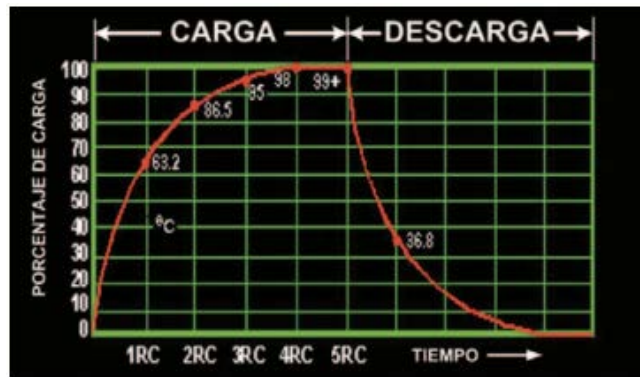


Figura 29: Curva carga/descarga de un ultracondensador [39]

Las principales aplicaciones que tiene son:

- Energías renovables, sobre todo en dos campos la energía fotovoltaica y la energía eólica.

a) *Fotovoltaica*

En sistemas fotovoltaicos se utilizan ultracondensadores dispuestos en paralelo para estabilizar la tensión de salida de las células, permitiendo además disminuir picos de tensión. Los ultracondensadores no solo tienen una mayor vida útil que las baterías para el almacenamiento solar, sino que además su eficiencia de carga es mayor que en las baterías (pérdida de energía en la carga 30% en baterías de plomo-ácido frente a un 10% de los EDLC). También su rango de temperaturas de trabajo se presenta como un factor clave para la elección de los mismos.

El motivo por el cual en la mayoría de ocasiones se descartan como opción válida es su densidad de energía, muy baja comparado con las baterías, lo que para el mismo espacio de almacenamiento tendríamos una cantidad mucho menor de energía almacenada, además de su mayor coste.

Sin embargo, su combinación puede ser muy beneficiosa, alargando la vida de las baterías sin necesidad de sobredimensionamiento, y proporcionando alta densidad de energía y potencia. Este sistema es muy adecuado para almacenamiento en microrredes. Es necesaria la utilización de convertidores de potencia bidireccionales para poder controlar la potencia entre ambos.

b) *Eólica*

Los EDLC pueden ser utilizados como alimentación para el control del ángulo de alabeo de las palas de los sistemas aerogeneradores. Cada pala posee un servomotor que se alimenta gracias a unas baterías, y gracias a él se mueven las aspas en el ángulo requerido. Normalmente se han utilizado baterías para esta alimentación, pero los pulsos de potencia que requiere este movimiento han obligado a los ingenieros a sobredimensionar dichas baterías. Hay que tener en cuenta también para este caso la

vida útil de las baterías, sumado al posible mantenimiento y dificultad de acceso a las baterías. Es por todo ello que los aerogeneradores de nueva generación incluyen ultracondensadores en vez de baterías para el control del ángulo de alabeo.

□ Transporte pesado y automoción

Es viable el uso de EDLCs en vehículos pesados, y así ha sido demostrado en proyectos como el de trenes ligeros en Alemania, vehículos pesados eléctricos que además incorporan supercondensadores. Estos permiten, por ejemplo, en un pequeño tramo de vía evitar las catenarias para el tranvía o en el arranque de los trenes o ferrocarriles, donde se requiere una gran potencia en escaso tiempo, aportar la energía suficiente para lograrlo. También son una solución a sobretensiones producidas después de una pérdida de contacto con la catenaria que pondría en riesgo los circuitos de la maquinaria eléctrica.

Son utilizados en vehículos eléctricos, híbridos y también en los denominados micro-híbridos (incluyen el sistema Start&Stop). En todas las ocasiones los EDLCs son un sistema complementario a su sistema de propulsión habitual, no constituyen un sistema de almacenamiento principal.

□ Sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS o SAI).

La finalidad de los ultracondensadores en momentos de un corte de suministro no es suplir dicho suministro durante todo el periodo, sino que gracias a la potencia que pueden aportar en poco tiempo permita el funcionamiento del sistema durante pocos minutos, y justo después entre en juego el banco de baterías o el generador diésel, los cuales necesitan este periodo de tiempo para ponerse en marcha o proporcionar la energía necesaria.

□ Almacenamiento energético (memorias de PC, relojes, cámaras de alta precisión, etc).

En estas aplicaciones se incorporan sistemas digitales cuya memoria necesita estar siempre alimentada. Un corte de este suministro puede provocar la pérdida de toda la información almacenada. En lugar de utilizar baterías, las cuales necesitarán un mantenimiento y será necesario reemplazarlas debido a su ciclabilidad, se han comenzado a utilizar EDLCs, que además resultan ser más económicos en este tipo de aplicaciones (siempre en baja potencia).

□ Sistemas de transferencia de potencia

Los supercondensadores tienen una relevancia considerable en el campo de la transferencia de energía. Los STATCOM (Compensador Estático Síncrono), dispositivos que aportan o absorben potencia, son utilizados con el fin de controlar de

picos de tensión en la red de suministro. En el momento que son acoplados a sistemas que transfieren potencia aparece una alta inductancia, y con ello, un aumento de la corriente y picos de tensión. La solución a este problema consiste en utilizar capacitancias para estabilizar la tensión y obtener una corriente constante.

Hasta ahora se han utilizado condensadores convencionales o baterías como dispositivos de carga de este sistema. Sin embargo, los ultracondensadores se presentan como una mejor opción en este campo, ya que se requiere una reducida densidad de energía y altas velocidades de carga y descarga.

☐ Grúas y ascensores

Ambos sistemas presentan un funcionamiento con un consumo bastante equilibrado, debido a la utilización de contrapesos. Sin embargo, en la aceleración de subida y en la frenada durante la bajada existen grandes picos de consumo. Esto hace necesaria la presencia de la red de suministro y el uso de resistencias para el frenado que suponen un consumo de potencia alto.

Los ultracondensadores se están aplicando en este campo para almacenar energía que llega gracias a un sistema regenerativo controlando el motor, y debido a sus características de potencia y ciclabilidad hacen idóneos a los supercondensadores para esta aplicación.

Resumen:

- ☐ Permite funcionar con altas corrientes.
- ☐ Alto rendimiento (hasta 98%).
- ☐ Alta ciclabilidad y larga vida.
- ☐ Bajas necesidades de mantenimiento.
- ☐ Trabaja con un amplio rango de temperaturas (-40 – 70°C).
- ☐ Inmunidad a vibraciones y golpes.
- ☐ Gran densidad de energía (1-10 Wh/kg).
- ☐ Permite cargas y descargas rápidas.
- ☐ Más seguros que las baterías y mucho menos contaminantes.
- ☐ Se pueden combinar fácilmente con las baterías, cuya sinergia ofrece las ventajas.

- Capacidad de almacenamiento limitada (baja densidad de energía).

3.3.3.2. Almacenamiento en imanes conductores (SMES)

Los imanes superconductores (*Superconducting Magnetic Energy Storage*) constituyen una novedosa forma de almacenamiento, que aunque es poco económica en la actualidad, es una de las formas de almacenamiento energético masivo que promete tener una vital importancia.

Este dispositivo de almacenamiento guardará en su interior energía procedente de un campo magnético que es generado mediante la aplicación de una corriente continua aplicada a la bobina. Su funcionamiento es idéntico al de una inductancia convencional, sin embargo, es el carácter superconductor lo que produce que se elimine la resistencia conductiva. Que se elimine esta resistencia implica que no se produce calor en la bobina, y no tendremos pérdidas por disipación térmica.

Los superconductores están formados por una bobina superconductora que se conecta a una fuente de tensión. Esta bobina estará criogenizada mediante Helio líquido o Nitrógeno líquido a una temperatura inferior a la crítica con el fin de que la bobina pueda mostrar su propiedad de superconducción. Una vez que se consigue que la bobina se cargue completamente, la corriente se mantiene constante y la energía (magnética) permanece, en teoría, almacenada sin límite de tiempo.

La energía almacenada en el campo electromagnético es:

$$E = \frac{1}{2}LI^2$$

siendo: E = energía almacenada [J], L = Inductancia [H], I = Corriente [A]

Los principales componentes de un superconductor son:

- Bobina superconductora.
- Sistema de refrigeración criogénico.
- Sistema de potencia (rectificador e inversor).

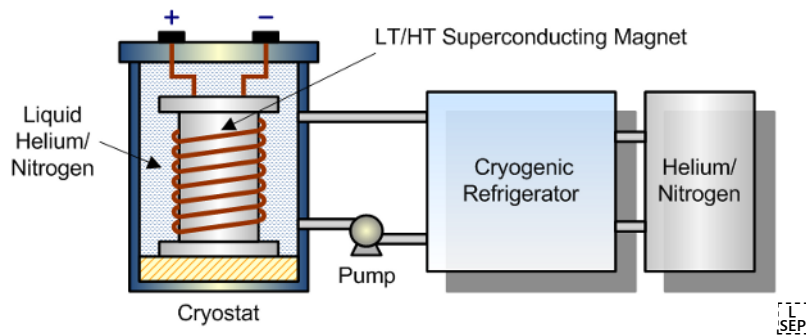


Figura 30: Esquema de un superconductor [44]

Las características principales de estos dispositivos son:

- ☐ Rango de energía almacenada: 10000-13000 MWh
- ☐ Rango energía disponible: 9000-10000 MWh
- ☐ Rango de potencia: 1000-2500 MW
- ☐ Duración de carga y descarga: desde milisegundos hasta horas
- ☐ Corriente máxima: 50000-300000 A
- ☐ Ciclabilidad: >100000
- ☐ Rendimiento superconductor: $\approx 100\%$
- ☐ Potencia refrigerador: 20-30 MW
- ☐ Rendimiento total: $\approx 90\%$ (debido a las pérdidas en rectificador/inversor)
- ☐ Profundidad baja superficie de instalación: 300-400m

Existen distintos tipos de superconductores:

- ☐ SMES de baja temperatura crítica: se emplean con Helio líquido a 4 K y utilizan bobinados. Esta temperatura está tan próxima a la temperatura de cero absoluto que resulta inviable para dispositivos comerciales con la tecnología disponible actualmente.
- ☐ SMES de alta temperatura crítica: utilizan Nitrógeno Líquido a 77 K y también poseen bobinados. Aunque presenta problemas similares al caso anterior con el Helio, el Nitrógeno líquido es menos costoso económicamente.
- ☐ SMES de alta temperatura crítica sin bobinado: posee una ciclabilidad ilimitada y elimina los problemas que puedan surgir dependientes del bobinado.

Las principales aplicaciones que tiene son:

- así
- ☐ La utilización de dicha energía almacenada para aportarla a la red y mejorar la calidad del suministro, ayudando a suplir microcortes y huecos de tensión.
 - ☐ Almacenamiento y recuperación de energía procedente de excedentes de centrales eléctricas.
 - ☐ Recuperación y acumulación de energía cinética procedente de frenada de vehículos de transporte pesados y automóviles.

Actualmente se está investigando trabajar con temperaturas de 0K para tratar de alcanzar las características ideales de resistividad y permisividad magnética.

Resumen:

- ☐ Tecnología en fase de desarrollo.
- ☐ Tecnología de alto costo.
- ☐ Almacenamiento electromagnético.
- ☐ Necesitan estar conectados a una fuente de tensión, si no, se descargan.
- ☐ Resistividad eléctrica idealmente nula, con muy alta permisividad magnética.
- ☐ Temperaturas entre -253 y -263oC en recipientes con Helio líquido y aislados mediante vacío.
- ☐ Rendimiento muy cercano al 100%.
- ☐ Puede almacenar, en teoría, la energía para siempre si se corta la corriente.
- ☐ No producen efectos térmicos en su alrededor ni grandes campos magnéticos.
- ☐ Sin necesidad de mantenimiento.

3.3.4. Almacenamiento electroquímico

3.3.4.1. Almacenamiento de hidrógeno

El almacenamiento gracias al hidrógeno trata de, gracias a la energía eléctrica o térmica procedente de centrales térmicas, nucleares, eólicas, etc, convertir compuestos químicos para transfórmalo más adelante en energía eléctrica.

El hidrógeno es un combustible en el que se están depositando muchas esperanzas y al que se está dedicando un gran esfuerzo investigador. Sin embargo, el hidrógeno no es un combustible más. Por una parte tiene unas propiedades físicas y químicas bastante diferenciadas de los demás combustibles; por otra, no es un recurso natural, es decir, no se encuentra de forma aislada en la naturaleza, sino que se encuentra combinado en otros compuestos, como los hidrocarburos o el agua.

Este sistema de almacenamiento permite tanto el almacenamiento masivo como el almacenamiento a pequeña escala, sin embargo, es más atractiva la idea de almacenamiento masivo, debido a la reducción de costes. Puede combinarse con cualquier fuente de energía, renovable o no, además de poder utilizarse incluso como fuente de energía en sí mismo.

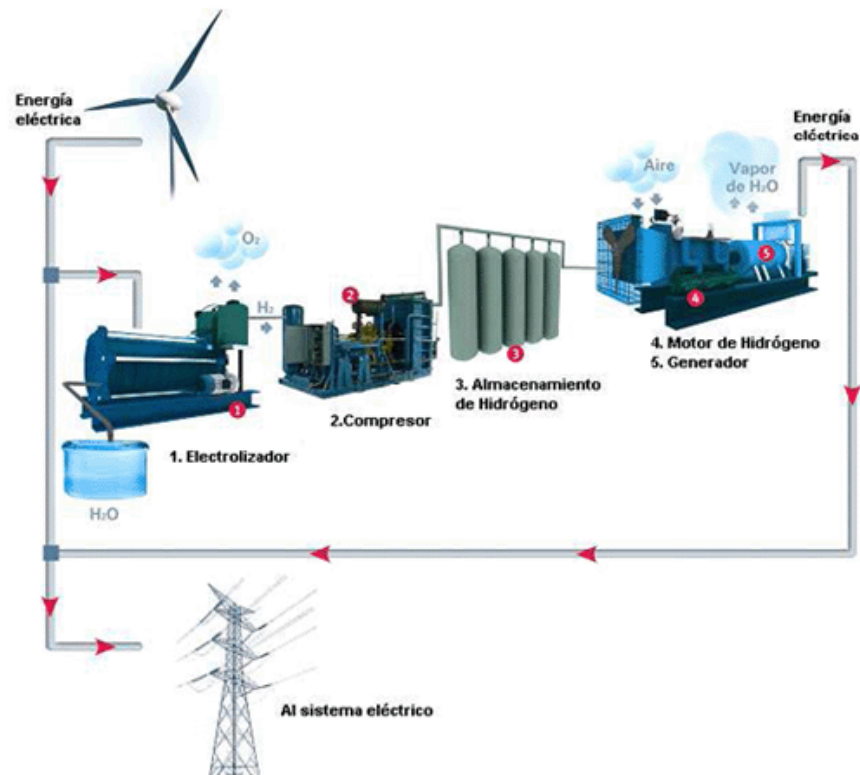


Figura 31: Ejemplo de almacenamiento de hidrógeno a través de un parque eólico [55]

Métodos para la obtención del hidrógeno:

- Procesos termoquímicos: gracias al calor solar concentrado a altas temperaturas se desarrolla un proceso endotérmico termoquímico. Una característica muy beneficiosa de este tipo es que al aumentar la temperatura de reacción, aumenta el rendimiento de la conversión (aunque también aumentan las pérdidas de calor). La eficiencia de este método es mayor que la de los dos siguientes.
- Procesos electroquímicos: se utilizan las plantas solares o las eólicas para la transformación gracias a un proceso electrolítico.
- Fotólisis del agua: se refiere a la conversión de agua y energía solar (utilizada) a hidrógeno

El hidrógeno es un elemento complejo de almacenar y costoso, debido a su baja densidad y alta difusividad, lo que deriva en que los contenedores deban estar perfectamente sellados.

Es posible tener almacenamiento del material en los tres estados. Debido a que su producción resulta en estado gaseoso puede pensarse que este sería el mejor modo de almacenamiento. Sin embargo, nada más lejos de la realidad el almacenamiento en estado gaseoso no es competitivo frente al resto de combustibles, porque su densidad es muy baja y por el coste que suponen los recipientes con la presión necesaria.

Se suele almacenar el hidrógeno en estado líquido (criogenizado) debido a su menor volumen ocupado. Los recipientes para este almacenamiento deben estar aislados por vacío o refrigerados gracias a una doble capa con otro elemento criogenizado, por ejemplo nitrógeno. Estos sistemas son complejos y caros.

Por último, se puede almacenar el hidrógeno en estado sólido, permitiendo que sea absorbido por otro material, como hidruros metálicos o materiales muy porosos. Así se logra aumentar la densidad de almacenamiento.

Las principales aplicaciones del almacenamiento de hidrógeno se basan en la producción de energía eléctrica a partir del hidrógeno:

- Combustión de hidrógeno: se quema el hidrógeno para generar electricidad gracias a unas turbinas de gas, ciclos combinados o utilizado simplemente a modo de combustible (de motores por ejemplo). Esta aplicación tiene un potencial inconveniente: la temperatura en la llama supera los 3000°C.
- Pilas de combustible de hidrógeno: se trata de la principal aplicación del hidrógeno, en el que el hidrógeno actúa como combustible en la pila, la cual

genera electricidad a partir de la reacción química. Aunque la pila de combustible también funciona con combustibles fósiles, su rendimiento es mayor con hidrógeno, debido a su mayor densidad energética.

Este método de almacenamiento actualmente se encuentra todavía en fase de investigación, pero en un futuro puede llegar a convertirse en una forma principal de almacenamiento, pudiendo incluso utilizarse como almacenamiento intermedio.

Su lado más prometedor es la sinergia con las plantas de producción eólicas y fotovoltaicas, donde se están realizando diversos progresos. La producción de hidrógeno gracias a fuentes de energías renovables podría aumentar hasta un punto que se impusiera el hidrógeno como fuente principal de energía. Sin embargo, actualmente nos encontramos con la barrera de ser comercialmente inviable, debido al alto coste de producción de la materia prima.

Resumen:

- ☐ Se puede producir de forma ilimitada (agua).
- ☐ Su combustión no contamina.
- ☐ Compatible con todas las energías primarias.
- ☐ Problemas de seguridad.
- ☐ Elevado coste.
- ☐ Necesidad de alta pureza del hidrógeno.
- ☐ Tiempo de respuesta entre horas y días.
- ☐ Baja eficiencia (30-50%).
- ☐ Alta densidad energética del hidrógeno.
- ☐ Amplio rango de almacenaje (desde kW hasta algunos MW).
- ☐ Es posible aplicar una construcción modular, lo que permite redimensionar el sistema.

3.3.4.2. Pila de combustible

Una pila de combustible, también llamada célula o celda de combustible es un dispositivo electroquímico de conversión de energía similar a una batería, pero se diferencia de esta última en que está diseñada para permitir el reabastecimiento continuo de los reactivos consumidos; es decir, produce electricidad de una fuente externa de combustible y de oxígeno en contraposición a la capacidad limitada de almacenamiento de energía que posee una batería.

Los reactivos que se utilizan normalmente son el hidrógeno en el ánodo y el oxígeno en el cátodo, en el caso de una pila de hidrógeno, mientras que en las baterías, los reactivos consumidos son sólidos y cuando se agotan se recargan mediante energía eléctrica. Los productos que resultan de las reacciones de una pila de combustible son calor, electricidad y agua. También existen razones para implantar el hidrógeno como nuevo vector energético: evitar la contaminación que produce la quema de los combustibles fósiles y el carácter inagotable del hidrógeno (aunque éste no se encuentre en estado puro en la Tierra).

El mecanismo de funcionamiento de una pila de combustible se basa en la oxidación del hidrógeno en el ánodo y la reducción del oxígeno en el cátodo, creando de esta manera una diferencia de potencial entre ambos electrodos (justo lo contrario a la reacción electrolítica). Esta tensión, se aplica a una carga conectada a la salida de la pila de combustible, generada gracias la transferencia de cargas a través de un electrolito aislante por el cual se presenta una fluencia de iones. A diferencia de las baterías, las cuales necesitan llenar su capacidad gracias a una fuente de tensión externa, las pilas de combustible transforman de forma directa el combustible a energía eléctrica.

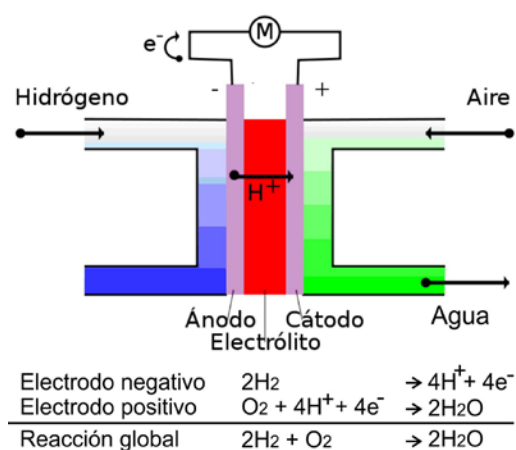


Figura 32: Esquema funcionamiento de una pila de combustible [58]

Dependiendo del tipo pila se puede emplear como combustible metano o monóxido de carbono entre otros, como alternativa al hidrógeno que es actualmente muy costoso de

producir y peligroso si se trata de forma inadecuada, pero dichos combustibles necesitan un reformado o purificación para el correcto funcionamiento de la pila. Sin embargo, el mayor rendimiento se alcanzará con el hidrógeno, además de que lo único que genera este combustible será agua.

Las pilas de combustible se clasifican según el electrolito que se utilice y las principales son:

- PEMCF (Pilas de membrana polimérica)
- AFC (Pilas de combustible alcalinas)
- PAFC (Pilas de ácido fosfórico)
- MCFC (Pilas de carbonatos fundidos)
- SOFC (Pilas de óxido sólido)

Tipo de pila de combustible	Tipo de electrolito	Rendimiento	Temperatura de operación	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
Pilas de Membrana Polimérica (PEMFC)	Polímero sólido.	60%	70-80 °C	Baja corrosión del electrolito y bajo mantenimiento de la pila. Rápido arranque y baja temperatura de operación. Acepta hidrocarburos ligeros reformados.	Catalizadores costosos y sensibles a impurezas.	Suministro energético para vehículos, máquinas portátiles y generación estacionaria.
Pilas de combustible Alcalinas (AFC).	Solución acuosa de hidróxido de potasio.	60%	90 - 100 °C.	Reacción catódica rápida y alta eficiencia.	Alta sensibilidad a las impurezas. Necesita emplear hidrógeno puro.	Aplicaciones militares y espaciales.
Pilas de Ácido Fosfórico (PAFC)	Ácido fosfórico líquido.	50-80 %	175 - 200 °C	Alta eficiencia en cogeneración de electricidad y calor. Acepta hidrógeno impuro.	Baja corriente y potencia. Gran peso y volumen.	Aplicaciones de generación estacionaria. Aparatos portátiles.
Pilas de Carbonato Fundido (MCFC)	Solución líquida de litio, sodio y potasio.	60-90 %	600 -1000 °C	Alta eficiencia debido a la alta temperatura. Catalizadores relativamente baratos.	Baja vida útil por la corrosión a alta temperatura. Acepta hidrocarburos reformados, pero no tolera el azufre.	Generación estacionaria.
Pilas de Óxido Sólido (SOFC)	Óxido de zirconio sólido con adiciones de itrio. Sólido.	60-90 %	600 - 1000 °C	Debido a la alta temperatura, tienen alta eficiencia y los catalizadores son relativamente baratos.	Baja vida útil por la corrosión a alta temperatura. Acepta hidrocarburos reformados, pero no tolera el azufre.	Generación estacionaria.

Figura 33: Características principales pilas de combustible[56]

Las pilas de combustible ofrecen por lo general una alta densidad de energía, flexibilidad en el combustible que se utiliza y son fáciles de emplazar. Además, aunque en algunas de ellas la respuesta en el arranque sea lenta, tiene una rápida respuesta a las variaciones de carga, ya que simplemente se necesita añadir más combustible a la misma.

Actualmente están en fase de desarrollo, existen aplicaciones en automovilística y aplicaciones estacionarias, pero son únicamente prototipos. Su implantación en el mercado es muy escasa, al igual que su demanda. Sin embargo, se prevé que en un futuro próximo se utilicen a gran escala en aplicaciones móviles, tales como móviles,

[SEP]portátiles, vehículos, etc, además de las que alcanzarán una mayor importancia: las pilas estacionarias. Gracias a estas pilas estacionarias se podrá producir energía eléctrica a pequeña o a gran escala, con multitud de aplicaciones y multitud posibilidades en el campo de cogeneración. Su extensión en el mercado supondrá una mayor integración de las energías renovables, sobre todo por la afinidad entre la energía solar y eólica con las pilas de combustible.

Pero su desarrollo está también lastrado por la investigación de obtención del hidrógeno, aún demasiado costosa para ser viable económicamente, pero los expertos están de acuerdo en que el hidrógeno será el combustible del futuro y que posiblemente en algunos años las pilas de combustible se extenderán en el mercado mundial.

Resumen:

- ☐ Elevado rendimiento, hasta el 90% y alta eficacia del combustible.
- ☐ Admite (algunos modelos) como combustibles diversos elementos.
- ☐ La modularidad que posee es un aspecto clave a la hora de diseñar instalaciones, permitiendo mayor flexibilidad.
- ☐ Casi no necesitan mantenimiento y no contiene partes móviles.
- ☐ Más respetuosas con el medio ambiente, ya que se reducen las emisiones de [SEP]gases nocivos, comparando con los combustibles fósiles.
- ☐ No genera ruidos (aunque los equipos auxiliares que necesite sí).
- ☐ Versatilidad y facilidad para su instalación.
- ☐ Tecnología en desarrollo.
- ☐ Corrosión de los materiales debido a las altas presiones y temperaturas (en [SEP]ocasiones).
- ☐ Alto coste y baja fidelidad de los equipos.
- ☐ Funcionamiento complejo y delicado.

3.3.4.3. Almacenamiento en baterías

Las baterías suponen actualmente la principal forma de almacenamiento a pequeña escala, aunque están tomando importancia actualmente su utilización a gran escala; cuentan con multitud de aplicaciones, muchas más que cualquier otro tipo de sistema de almacenamiento, debido en parte, a que son el método más antiguo para almacenar energía.

Las baterías son células recargables que almacenan y devuelven energía eléctrica gracias a reacciones químicas en su interior y como bien se conoce, existen diferentes variantes de ellas. Son sus componentes los que determinan sus cualidades, tales como capacidad de carga y descarga, capacidad, densidad de energía o ciclabilidad.

El principio de funcionamiento de una batería está basado básicamente en un proceso reversible llamado reducción-oxidación, donde uno de los componentes se oxida (pierde electrones) y el otro componente se reduce (gana electrones). Por lo tanto, se trata de un proceso en el que los componentes no se consumen, sino que únicamente cambian su estado de oxidación; por otro lado, dichos componentes pueden retornar a su estado original en las circunstancias adecuadas. Estas circunstancias son el cierre del circuito externo durante el proceso de descarga y la aplicación de una corriente externa durante el proceso de carga.

Los ciclos de carga/descarga definirán la vida útil de las baterías. A medida que una batería es descargada y cargada, su capacidad sufre alteraciones, de manera que, tras un cierto número de ciclos, la batería pierde calidad y no consigue completar con éxito las reacciones químicas. La carga en exceso puede también ser perjudicial para su vida útil.

Las baterías también sufren un efecto denominado como “auto-descarga” cuando no se utilicen puesto que, a pesar de que no se empleen, la energía almacenada en su interior irá disminuyendo progresivamente con el paso del tiempo de forma espontánea.

Otro de los efectos que sufren las baterías es el llamado “efecto memoria”. Consiste en un fenómeno que reduce la capacidad de la batería con cargas incompletas. Se produce cuando se realiza la carga de una batería sin llegar a haber sido descargada del todo, lo que genera la creación de una especie de cristales en el interior que va a debilitar los electrodos y hace que la batería pierda parte de su capacidad real.

Parámetros principales de las baterías, los cuales nos permitirán definir sus especificaciones, son los siguientes:

- Tensión de circuito abierto: voltaje máximo que puede aportar una batería.

Hay que tener en cuenta que la batería posee una resistencia interna, por lo que:

$$V_{\text{CARGA}} = V_{\text{OC}} + I \cdot R_{\text{INTERNA}}$$

Tendrán una tensión en la carga algo variable dependiendo del tiempo debido a esta resistencia interna.

□ Capacidad: se trata del parámetro más importante en la especificación de una batería y se mide en Ah. La capacidad está relacionada con la capacidad de descarga de la batería, y cuanto mayor es la segunda, menor es la primera. Generalmente se tiene una curva típica de descarga, que nos proporciona una determinada capacidad, establecida por el fabricante, que variará según el régimen de descarga al que sea sometida.

□ Estado de carga (SOC, State of Charge): indica el porcentaje de carga en la batería. Aunque en teoría el recorrido de carga/descarga de una batería es del 0-100%, en la práctica, en muchos tipos de baterías no es posible o recomendable descargar a menos de un 20-30%.

□ Corriente de descarga máxima: existe una corriente máxima que puede generar una batería, y cuanto mayor sea esta, menor cantidad de energía podrá dar. Si aumenta la corriente de descarga, disminuye la capacidad.

□ Vida de la batería (SOH, State of Health): se refiere a la vida útil que posee la batería. Esta disminuirá en mayor o menor medida dependiendo de su uso, la profundidad de descarga alcanzada, número de ciclos completados, etc.

□ Estado de funcionamiento: con el estado de funcionamiento se comprobará si la batería funciona correctamente, aportando la tensión especificada a la salida y sin fallos en los otros parámetros.

□ Profundidad de descarga (DOD, Depth of Discharge): es el parámetro que indica el porcentaje de descarga que se puede alcanzar en una batería, como hemos dicho antes, en multitud de ocasiones no podemos descargar a un porcentaje inferior.

Existe una gran variedad de baterías para el almacenamiento de energía eléctrica, a continuación las analizaremos:

Plomo-Acido

Las baterías de plomo-ácido son las más maduras comercialmente a nivel mundial. En consecuencia, presentan un mayor desarrollo tecnológico y un menor coste de inversión. Sin embargo, esta tecnología presenta algunos inconvenientes como la necesidad de unos complejos requisitos de mantenimiento, así como que la energía que pueden descargar no es fija, sino que depende del mínimo estado de carga admisible por cada batería.

Poseen un electrodo de plomo y otro de peróxido de plomo; su electrolito es ácido sulfúrico disuelto en agua. Cuando la batería se encuentra descargada, la densidad del electrolito disminuye, y aumenta cuando está cargada.

Sus principales ventajas e inconvenientes son:

- ☐ Aportan una tensión elevada ($V_{sal_{celda}} = 2.1V$)
- ☐ Son capaces de soportar elevadas corrientes de descarga y por tanto, aplicar una alta potencia de descarga.
- ☐ Son muy baratas y fáciles de encontrar.
- ☐ Altamente reciclables. En España se reciclan el 95% de las baterías ya usadas.
- ☐ Tecnología madura.
- ☐ Rendimiento del 80%.
- ☐ Baja energía específica (10-40Wh/kg)
- ☐ Ciclabilidad muy baja ante descargas muy profundas (400 – 800 ciclos). Con ciclos de descarga menos profundos la ciclabilidad aumenta hasta 4500 ciclos.
- ☐ Ocupan un volumen muy amplio y su peso es elevado. 
- ☐ Existe la posibilidad de explosión debido al desprendimiento de hidrógeno.
- ☐ Contaminan mucho debido a los compuestos de plomo, antimonio y arsénico.
- ☐ Algunas requieren mantenimiento específico.

Este tipo de baterías posee un inconveniente a mayores: la sulfatación. La sulfatación es el resultado de la descarga de la batería de forma profunda continuadas veces por debajo del mínimo especificado, también una carga incorrecta, o la inactividad de la misma. Se producen cristales que disminuyen la superficie activa del electrodo, y la capacidad de la batería disminuye. Este fenómeno puede paliarse con descargas con altas corrientes para disolver los cristales.

Las baterías de plomo-ácido son ampliamente utilizadas en sistemas fotovoltaicos. Además, tienen una vital importancia actualmente en aplicaciones en automóviles de motor de combustión para su utilización en el arranque del vehículo.

Los costes de las baterías más avanzadas de plomo-ácido son de aproximadamente de 360€/kWh y su mantenimiento de 2€/kWh.

Acerca del futuro de las baterías de plomo-ácido, son más utilizadas por el aumento constante de la flota de vehículos, y debido a su precio y su disponibilidad son en muchas ocasiones una mejor opción. Además, con el surgimiento de una nueva generación de baterías de plomo ácido, cuyo rendimiento alcanza el 90%, sigue haciendo a estas antiguas baterías aún atractivas a todos los niveles de aplicación.

Níquel/Cadmio (Ni/Cd)

Estas baterías poseen un ánodo de níquel y un cátodo de cadmio. Sus principales ventajas e inconvenientes son:

- ☐ Ciclabilidad de aproximadamente 1500 ciclos.
- ☐ Tensión de la celda 1.3V constante hasta el 85% de la descarga.
- ☐ Admiten cargas y descargas rápidas, además de sobrecargas y descargas profundas.
- ☐ Permiten estar largos periodos de tiempo en un estado de carga bajo.
- ☐ Pueden operar a baja temperatura.
- ☐ No exigen mantenimiento y no liberan gases corrosivos.
- ☐ Son muy tóxicas debido al cadmio.
- ☐ Baja densidad energética (60 Wh/kg).
- ☐ Autodescarga considerable (3-6% / mes).
- ☐ Baja capacidad para situaciones de descarga lenta.

- ☐ Poseen efecto memoria.
- ☐ A altas temperaturas su eficiencia se reduce considerablemente.
- ☐ El coste de los materiales para los electrodos es elevado.

Este tipo de baterías era utilizado en vehículos, pero fueron prohibidas en la UE a partir del año 2008, es por ello que no se desarrollará más este tipo de batería.

Níquel-Metal-Hidruro (NiMH)

Las baterías de NiMH se consideran la evolución de las de Ni-Ca, y son muy similares, con la ventaja de que no tenemos cadmio entre sus componentes. El cátodo es de oxihidróxido de níquel (NiOOH), el ánodo está formado por una aleación que puede insertar hidrógeno y el electrolito de hidróxido potásico (KOH).

Principales ventajas e inconvenientes:

- ☐ Más energía específica que las baterías de plomo ácido (70 Wh/kg).
- ☐ Permiten cargas y descargas rápidas, entre 1 y 3 horas.
- ☐ Contaminan mucho menos que las dos anteriores, debido a que no presentan cadmio ni plomo.
- ☐ No es necesario mantenimiento.
- ☐ Disminuye la capacidad notablemente al descargar con corrientes elevadas.
- ☐ Baja ciclabilidad (menos de 1000 ciclos) debido a la corrosión del electrolito, y menor aún si son utilizadas en aplicaciones de tracción.
- ☐ Precio elevado, en comparación con Pb-ácido (unas 4 veces superior).
- ☐ Poseen efecto memoria.
- ☐ Autodescarga del 1.5% diario.

Entre sus principales utilidades se encuentra el vehículo eléctrico y el vehículo híbrido. Otra aplicación debido a su capacidad de recargas rápidas es el almacenamiento de energía procedente del frenado regenerativo.

Ión-Litio

El litio es un material muy ligero, con un gran potencial electroquímico y puede acumular grandes cantidades de energía. Es característico de las baterías de ión-litio que los dos electrodos pueden absorber o devolver iones reversiblemente, y sólo el ánodo

estará compuesto de litio. En su primera versión se utilizaba como cátodo un electrodo de carbón, pero actualmente son de grafito, debido a sus características de descarga.

Se descubrió que este tipo de baterías, debido a la ciclabilidad, reducían la estabilidad térmica de la misma y aumentaba potencialmente la fuga térmica (pueden llegar a arder de forma espontánea).

Principales características:

- ☐ Poseen un alto voltaje, entre 3 y 4 V/celda, el mayor entre las baterías.
- ☐ Alta energía específica (80-170 Wh/kg), más del doble que las de NiMH y más de cuatro veces las de Pb-ácido.
- ☐ Alto rendimiento, alcanzando el 94%.
- ☐ Alta ciclabilidad. Conservan el 90% de capacidad después de los 1000 ciclos.
- ☐ Mucho menos contaminantes, ya que no contienen plomo, cadmio o mercurio.
- ☐ Baja autodescarga.
- ☐ Su coste es elevado.
- ☐ Pierde prestaciones cuando la temperatura supera los 50°C.
- ☐ Se degradan rápidamente cuando la descarga es muy profunda o se sobrecarga la batería.
- ☐ Mínimo estado de carga del 10%.
- ☐ Necesitan un empaquetamiento especial y un circuito de protección interno frente a sobrecargas.

Su coste es bastante elevado en comparación con otras baterías, en torno a los 530€/kWh y los 3€/kWh de costes de mantenimiento y operación.

Como aplicaciones principales nos encontramos con su uso en el vehículo eléctrico o híbrido como batería de tracción y también en todo tipo de aparatos de electrónica de consumo, como teléfonos móviles o portátiles. Además se puede encontrar en aplicaciones de almacenamiento a gran escala como es el proyecto ALMACENA de Red eléctrica de España, que consiste en la instalación de un gran bloque de baterías de Ión-litio en la ciudad de Sevilla con la finalidad de aumentar la eficiencia del sistema

eléctrico.

Parece que el mercado tiende a que las baterías ión-litio aumenten, debido a su utilización a pequeña escala en aparatos electrónicos, pero también destacan en el almacenamiento en viviendas con el fin de para alcanzar una *smart-grid*. Y no sólo eso, sino también a nivel industrial, como aplicación a regulación de carga de las redes eléctricas y un mayor control de la demanda. Todo apunta a que en general, todas las baterías tendrán una mayor investigación, desarrollo y aplicación en un futuro.

Sodio – sulfuro (NaS)

Estas baterías son de sales fundidas, como las anteriores, pero en este caso son azufre fundido y sodio fundido (electrodos positivo y negativo respectivamente). El electrolito es un material cerámico sólido, a través del cual se realiza el intercambio de iones. Principales características de las baterías sodio-sulfuro:

- ☐☐☐ Necesitan temperaturas superiores a 300oC para su funcionamiento.
- ☐☐☐ Estado mínimo de carga del 10%.
- ☐☐☐ Alta ciclabilidad (4500 ciclos).
- ☐☐☐ Rendimiento del 89%.
- ☐☐☐ Son 100% reciclables.
- ☐☐☐ Alta densidad de energía.
- ☐☐☐ Bajo coste de los materiales.
- ☐☐☐ Permite utilizarse para almacenamiento masivo.
- ☐☐☐ Madurez comercial.

Su coste de adquisición ronda los 285€/kWh y su coste de mantenimiento 3€/kWh.

Este tipo de baterías son especialmente adecuadas a aplicaciones no móviles y de gran escala. Se utiliza extensamente en almacenamiento procedente de energía eólica.

Zebra (NaNiCl)

Se trata de un nuevo tipo de baterías con un futuro muy prometedor, sobre todo en el campo del vehículo eléctrico. Esta peculiar batería denominada de sal fundida debido a su electrolito, funciona a una temperatura que va desde los 270oC a los 350oC, no posee efecto memoria y se compone de materiales realmente económicos (sal, NaCl), níquel y hierro. Son capaces además de operar a voltajes muy altos, del orden de 600V.

Entre sus principales características se encuentran:

- ☐ Precio bajo, hasta 4 veces inferior al de las baterías de Ión-Litio.
- ☐ Energía específica elevada (125 Wh/kg), 3 veces superior a las baterías de Pb-^[L]_{SEP}ácido.
- ☐ Alta ciclabilidad (hasta 3000 ciclos).
- ☐ Permite recarga rápida.
- ☐ Es 100% reciclable y no tóxica.
- ☐ Casi no necesitan mantenimiento.
- ☐ Rango de temperaturas de operación elevado (270-350oC), por lo que será necesario aislarlas. Posee problemas de seguridad e inflamabilidad.
- ☐ Pérdidas térmicas mientras no se esté utilizando.
- ☐ Capacidad de la batería y su tamaño están limitados.

Como aplicación podemos encontrar este tipo de baterías en el vehículo eléctrico Think City. Son muy apropiadas para vehículos pesados, como camiones eléctricos o autobuses eléctricos. Se presentan como alternativa a las baterías de Ión- litio, y no sólo en aplicaciones móviles. Actualmente en España el uso de estas baterías está estancado pero se espera que, gracias a un mayor de las mismas, tengan una progresiva introducción en nuestro mercado.

Baterías de flujo redox

Las baterías de flujo redox son una hibridación entre una batería y una pila de combustible. El electrolito, como en estas últimas, se almacena en tanques externos y se bombeará a los stacks de la batería.

El esquema de esta batería será:

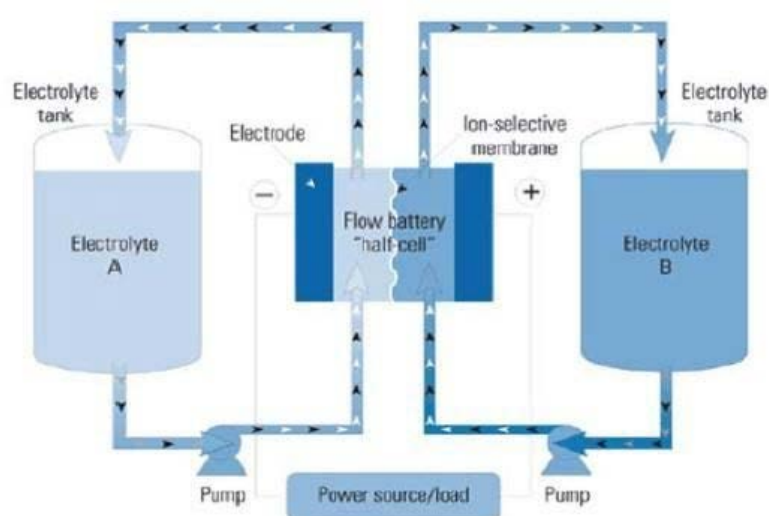


Figura 34: Esquema de una batería de flujo redox [64]

En estos sistemas electroquímicos se producen reacciones de reducción y oxidación sobre los electrodos gracias al electrolito. Suelen tener una alta tasa de vida útil, pero también la densidad de corriente que pueden aportar es bastante baja, debido a los materiales activos. Además, otra característica de ellas es que la capacidad puede variar según la cantidad de electrolito que se disponga, siendo independiente el diseño de la capacidad energética de la capacidad de potencia. Además, estas poseen un bajo nivel de autodescarga.

Las baterías de flujo redox poseen una eficiencia de hasta el 85% y poseen una gran velocidad de respuesta, pudiendo entregar altas potencias (más de dos veces su potencia nominal) durante algunos minutos (alta capacidad de respuesta en carga y descarga). Por esto tienen tanta importancia en aplicaciones de calidad de energía y estabilización de la red.

Como principales desventajas nos encontramos con la relativa baja densidad de energía por volumen (en comparación con las baterías), por lo que se necesitará un mayor número de celdas para aportar la misma potencia, y también la complejidad que conlleva su sistema, siendo su necesario sistema de control complejo y caro. Es su necesidad de aportar un tanque externo con electrolito, lo que conlleva peso y volumen, lo que puede limitar su aplicación en automóviles.

Nos encontramos con dos tipos de baterías de flujo redox (comerciales):

□ *Batería de Vanadio (VRB):*

Principales características de las baterías de flujo de Vanadio:

- Su tensión en circuito abierto es aproximadamente de 1.41V.
- Densidad energética 15-25 Wh/L.
- Energía específica 10-20 Wh/kg.
- Eficiencia 75-85%.
- Vida útil muy alta, en torno a los 15-20 años.

Las del tipo Vanadio pueden optimizarse para entregar potencia activa o potencia reactiva, debido a su alta velocidad de respuesta, y gracias a su posible enorme capacidad son una excelente opción para almacenamiento masivo de energía, alcanzando una buena sinergia con fuentes renovables muy variables, como solar y eólica, o en aplicaciones de generación híbrida, pudiendo sustituir a las baterías de plomo-ácido en este aspecto.

□ *Zinc-Bromo (Zn-Br):*

Principales características de las baterías de flujo de Zinc-Bromo:

- Su tensión en circuito abierto es de 1.8V aproximadamente.
- Densidad energética 15.7-39 Wh/L.
- Energía específica 34.4-54 Wh/kg.
- Eficiencia 70-80%.

3.4. Almacenamiento a pequeña escala

Analizaremos dos ejemplos de almacenamiento

☐ *Powerwall 2 (Tesla)*

Powerwall 2, se presenta como la pionera en almacenamiento de energía a nivel doméstico con la cual se puede optimizar el uso de la energía solar instalada en la vivienda. Se ha de destacar que Tesla no ha inventado ningún tipo de almacenamiento nuevo, pero sí ha mejorado el tipo de baterías que utiliza para su comercialización, abriendo camino al autoabastecimiento energético para un público mucho más amplio. Propone instalar paneles solares en los tejados de las viviendas y fijar una o varias *Powerwall*, dependiendo de la energía que necesitemos, ancladas en paredes de alguna habitación del hogar. Es necesario almacenar la energía de los paneles solares durante el día para poder utilizarla en las horas que no haya sol o cuando necesitemos más potencia durante el día. Además este dispositivo podemos colocarlo sobre una pared, sin necesidad habilitar una habitación para el almacenamiento de baterías.

Con este dispositivo es posible además independizarse del suministro de la red eléctrica para autoabastecernos y también obtener electricidad para toda la casa cuando se produce un corte de suministro. Una solución válida por ejemplo en casos de viviendas aisladas en las que es demasiado caro pagar para instalar el suministro eléctrico o en poblaciones aisladas sin electricidad, incluso en pequeños negocios.

Gracias a este tipo de baterías se inicia un nuevo modo de consumo de energía que nos permite tener sistemas de energía distribuidos en vez de los actuales centralizados. [65]

Características:

- ☐ Instalación: Interior o exterior. En muro o en el suelo.
- ☐ Capacidad: 13,5 kWh.
- ☐ Inversor: Integrado. Fabricado por Tesla.
- ☐ Potencia: 5 kW continuo, 7 kW pico.
- ☐ Rango de temperatura óptima: -20°C a 50°C .
- ☐ Garantía: Sin límite de ciclos: 10 años.
- ☐ Dimensiones: 1150 x 755 x 155 mm
- ☐ Peso: 122 kg.
- ☐ Escalable: Hasta 16 unidades *Powerwall*.
- ☐ Profundidad de descarga: 100%.
- ☐ Eficiencia: 90% ciclo completo.
- ☐ Precio: 6880€.

A su vez Tesla y Solarcity han creado un tejado equipado con celdas solares (*Solar Roof*), es decir cada teja es una celda fotovoltaica. El techo solar podrá ser tan grande o pequeño como se necesite, ya que solo tendremos que conectar la teja a una fuente de alimentación o a una batería.

□ *RaStore (Solar Racket)*

RaStore es el competidor de la Powerwall de Tesla español, que utiliza igualmente baterías de ión litio para el almacenamiento fotovoltaico. Tiene una capacidad de 3 a 20 kW en un único pack.

El modo de funcionamiento es el mismo que el producto de Tesla: gracias a los paneles solares recogemos la energía en las baterías de ión litio, que posteriormente se transformará en alterna gracias a un inversor AC/DC. La diferencia con el competidor es que este producto ya lleva incluido el inversor, por lo que no hará falta comprarlo a mayores, además del controlador en el mismo aparato. Este producto es compatible incluso con la Powerwall de Tesla.

Según datos de la propia empresa, se pueden disminuir las emisiones de carbono de una vivienda media entre un 60 y 90%.^[67]

Los precios de los modelos de RaStore son los siguientes:

- Modelo 3 kW: 9.995 €
- Modelo 4 kW: 11.450 €
- Modelo 5 kW: 13.995 €

3.5. Conclusiones

El mundo a la vez que pasan los años ha ido evolucionando a una etapa donde el consumo energético es cada vez mayor. Hasta hace unos años se ha abusado del consumo de fuentes de energía procedentes de los combustibles fósiles, pero debido a su posible agotamiento en unas décadas y a una concienciación social por el medio ambiente, se ha posibilitado un cambio en el modelo energético, impulsando así el crecimiento de la implantación y consumo de las energías renovables.

Este crecimiento de las energías renovables y el continuo desarrollo de distintos sistemas de almacenamiento nos han guiado hacia un nuevo modelo de red eléctrica llamado *Smart Grid*, en el cual profundizaremos en el siguiente capítulo.

Realmente, todas las diferentes opciones de almacenamiento energético son válidas para la generación de energía, pero será necesario tener en cuenta su viabilidad, tanto tecnológica como económica.

Hoy en día, para aplicaciones de transporte y distribución la opción más competitiva es la pila de combustible. También tendríamos en cuenta el almacenamiento de aire comprimido a pequeña escala, pero resulta muy caro, y las baterías de Pb-Ácido, por su buen precio, aunque las baterías de Ión-Litio se han impuesto como las más utilizadas en el vehículo eléctrico.

En cuanto al almacenamiento a gran escala, el bombeo hidráulico y el almacenamiento de aire comprimido son las mejores opciones, debido a la buena relación volumen precio. Por el contrario ambas presentan el inconveniente de localizar un buen emplazamiento para su instalación.

En aplicaciones de calidad de la energía suministrada lo más competitivo actualmente son las baterías de ión-litio debido a su menor coste anual y su capacidad de descarga en un breve tiempo. También se presentan como muy buena opción las hibridaciones de sistemas con ultracondensadores, debido a su ciclabilidad y capacidad de descarga.

A continuación sacaremos conclusiones de cada tecnología de almacenamiento:

a) Aire comprimido:

Una de las mejores formas de almacenamiento energético masivo debido a su reducido precio de almacenaje, sobre todo si nos aprovechamos de cavidades naturales. A pequeña escala este almacenamiento no es competitivo económicamente frente al resto. Tiene buena sinergia con las energías renovables solar y eólica. A pesar de esto, es una tecnología no madura

actualmente, que posee grandes pérdidas.

b) Hidráulico de bombeo:

Es el sistema de almacenamiento masivo de energía con el coste de almacenamiento más bajo. Es una tecnología madura, tiene buen rendimiento, bajo mantenimiento y larga vida. Por el contrario este almacenamiento está limitado a su emplazamiento y se necesita un capital inicial elevado para construir la instalación. En España es uno de los más utilizados.

c) Volantes de inercia:

Este sistema de almacenamiento tiene multitud aplicaciones (tanto a pequeña como gran escala), como sistemas de alimentación ininterrumpida, regulación de frecuencia, vehículos y transporte pesado, hibridaciones, etc. Poseen la capacidad de carga y descarga muy rápidas con elevada eficiencia y alta ciclabilidad. Pero por contra, es una tecnología no madura, con altas pérdidas y poco económica. Se prevé que su utilización aumente mucho en los próximos años debido a sus grandes ventajas, sobre todo debido a su gran relación entre potencia y peso.

d) Almacenamiento térmico:

Este tipo de almacenamiento de energía puede aplicarse a gran escala o pequeña escala en edificios. Se complementa muy bien con la energía solar térmica y es utilizado en procesos de cogeneración, climatización y calefacción. Se disponen de materiales para aplicación específica, posee altos rendimientos y alta ciclabilidad con una capacidad de almacenamiento a largo plazo. Sin embargo, las pérdidas son variables dependiendo de la temperatura de trabajo, aumentando cuando éstas aumentan.

e) Ultracondensadores:

Los ultracondensadores poseen una alta sinergia con casi cualquier tipo de sistema de almacenamiento, permitiendo el mejor funcionamiento en la aplicación requerida con la utilización de ambos al mismo tiempo (los más comunes son con baterías y pilas de combustible), aunque no necesitan otro sistema de alimentación para su correcto funcionamiento. Poseen una amplia aplicación como transporte, sistemas de alimentación ininterrumpida, almacenamiento energético o transferencia de potencia. Tienen un altísimo rendimiento y ciclabilidad, además de permitir descargas y cargas rápidas, sin embargo, poseen poca densidad de energía y hoy en día su precio es aún elevado. Su utilización ha ido incrementándose a lo largo de esta última década, y se prevé que siga haciéndolo gracias al vehículo eléctrico y sistemas híbridos y de estabilización de cargas en la red.

f) Imanes conductores

Este almacenamiento de energía promete ser de una vital importancia en un futuro en almacenamiento masivo de energía, procedente de centrales nucleares, térmicas, energías renovables, etc. Presenta características muy atractivas como muy alto rendimiento, almacenamiento de la energía a muy largo plazo y no generan efectos térmicos ni campos magnéticos. Sin embargo, actualmente los inconvenientes superan las ventajas de este sistema, los principales son: las bajísimas temperaturas necesarias para la criogenización del sistema y el coste inicial y de almacenamiento. Esta tecnología se encuentra aún en fase de desarrollo.

g) Almacenamiento de hidrógeno

El hidrógeno promete ser el vector energético que revolucione el mundo de las energías renovables, el transporte y otras aplicaciones posibles. El hidrógeno es posible obtenerlo de forma ilimitada a partir del agua, su combustión no genera gases contaminantes, posee una gran densidad energética y puede complementarse con todas las fuentes de energía primarias. Sin embargo, aún presentan enormes inconvenientes, como el coste de su producción, la necesidad de alta pureza del hidrógeno, baja eficiencia de conversión de H_2 y su transporte. Parece que tendremos que esperar bastantes años a que se profundice en su investigación, ya que es muy limitada actualmente, y pueda a llegar a ser competitivo económicamente.

h) Pilas de combustible

Las pilas de combustible son semejantes a las baterías en el sentido en que se realiza una reacción química para dar lugar a energía eléctrica, sin embargo, en este caso tendremos un tanque de combustible externo, con lo cual se consigue aumentar enormemente la capacidad. Existen diferentes tipos de pilas de combustibles dependiendo del electrolito utilizado, lo que le proporciona sus propias características de rendimiento, temperatura de operación, densidad de corriente, etc. Sus aplicaciones son bastante variables, que van desde aplicaciones de generación estacionaria y móvil, hasta aplicaciones espaciales y cogeneración.

Se estimaba que para el año actual las pilas de combustible hubieran tenido un impacto en el parque automovilístico en todo el mundo, aunque realmente sólo existen algunos prototipos de vehículos que apenas se han llegado a comercializar. Por sus características prometen que sean una de los sistemas de almacenamiento con un mayor impacto en un futuro en todo tipo de aplicaciones, como su elevado rendimiento, modularidad y versatilidad, pero aún están en fase de desarrollo.

i) Baterías

Las baterías son el sistema de almacenamiento de energía más utilizado. Gracias a sus características, desarrollo, prestaciones y coste son normalmente el método más atractivo a la hora de almacenar energía (sobre todo a pequeña escala). La posibilidad de recarga de las baterías es el factor más atractivo de las mismas, teniendo también alta densidad de potencia, descarga a altas corrientes y buen funcionamiento a baja temperatura.

Existen dos tipos de baterías que se posicionan indiscutiblemente como las más utilizadas, comercializadas y desarrolladas: las baterías de Pb-ácido y las de ión-litio, cuyas posibles aplicaciones abarcan todo el abanico de posibilidades de almacenamiento. Las baterías de Pb-ácido son muy utilizadas en almacenamiento solar y en vehículos, debido a su bajo coste, gran disponibilidad, altamente reciclables, y son capaces de aportar altas corrientes de descarga. Por otro lado, las baterías de ión-litio lideran el mercado de aplicaciones móviles, tanto de equipos electrónicos como de movilidad eléctrica gracias al vehículo eléctrico, pero también en aplicaciones estacionarias se va imponiendo poco a poco, como se ha visto con la *PowerWall* o *RaStore*, debido a su alta energía específica, alto rendimiento y baja autodescarga (aunque poseen un precio elevado en comparación a la anterior).

4. SMART GRIDS

4.1. Red eléctrica actual

La red eléctrica actual forma el sistema encargado de hacer llegar energía a los hogares. Este sistema está formado por el conjunto de elementos para la generación, el transporte y la distribución de la energía, además de los mecanismos de control, seguridad y protección. [68]

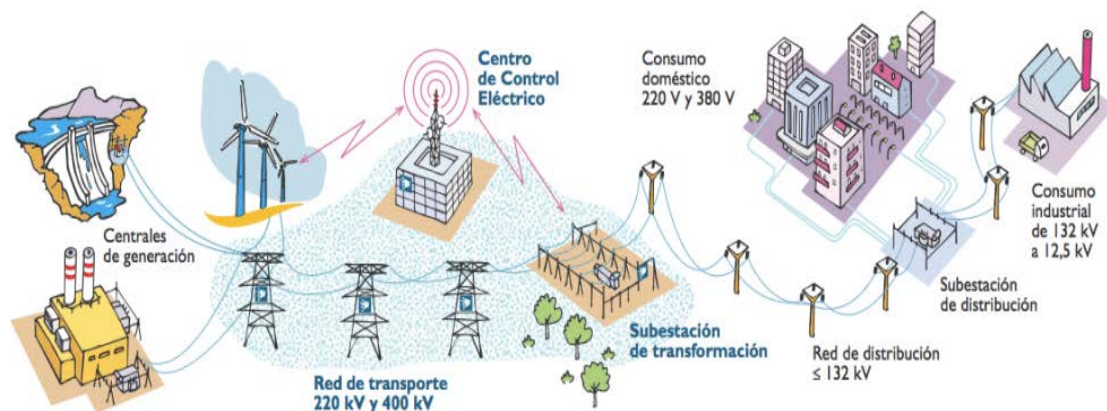


Figura 35: Esquema de la red eléctrica en España [69]

A continuación haremos una descripción de cada una de las etapas que forman dicho esquema:

- Generación: las centrales eléctricas generan la electricidad a partir de fuentes de energía. Estas fuentes de energía pueden ser no renovables (combustibles fósiles) o renovables. Las plantas de generación por lo general están localizadas cerca de fuentes de agua, alejadas de áreas pobladas y suelen ser de gran tamaño. El hecho de que la electricidad a nivel industrial se deba consumir en el momento en que se produce, obliga a disponer de centrales con potencias elevadas para hacer frente a las puntas de consumo. A la electricidad generada se le incrementa su tensión en las estaciones transformadoras elevadoras que se ubican a la salida de las centrales generadoras, las cuales se va a conectar a la red de transporte.
- Transporte: la red de transporte es la que se encarga de unir las centrales con las redes de distribución, a través de las centrales con las subestaciones de transformación. La línea de alta tensión es el medio físico mediante el cual se realiza la transmisión de energía eléctrica a grandes distancias. Están constituidas por el elemento conductor (cables de cobre o aluminio) y por el elemento de soporte, las torres de alta tensión.

□ Subestaciones de transformación: son vitales para el funcionamiento de cualquier sistema eléctrico. Proporcionan interconexión de todas las líneas entre sí con el fin de hacer llegar la energía generada en las centrales a los centros de consumo. Esto exige un cambio de tensión, la energía llega de la red de transporte a alto voltaje para recorrer largas distancias. En la subestación mediante un transformador se logra reducir dicha tensión para poder iniciar su distribución.

□ Redes de distribución: son las líneas eléctricas de aproximación a los grandes centros de consumo (ciudades e instalaciones industriales de cierta importancia). Mayoritariamente estas líneas suelen ser aéreas, y generalmente una vez llegan a los núcleos urbanos se utilizan redes subterráneas.

□ Centros de transformación: son los encargados de realizar la última transformación, reduciendo el voltaje de media tensión de distribución a voltajes con valores aptos de consumo en baja tensión. El voltaje de utilización en España va desde los 220V hasta los 380V en los casos de uso doméstico, mientras que en uso industrial los valores varían de 132kV a 12,5 kV.

□ Centro de control eléctrico: Es el responsable de la operación coordinada en tiempo real de las instalaciones de generación y de transporte del sistema eléctrico (CECOEL en el sistema eléctrico español). Con la información recibida de las subestaciones se comprueba el funcionamiento del sistema eléctrico en su conjunto y se toman decisiones de modificarlo o corregirlo si procede.

4.2. Smart Grids

Como comentamos en capítulos anteriores a medida que avanza la tecnología, las necesidades de consumo de energía de la sociedad han ido creciendo, lo que ha provocado un aumento en la demanda de energía eléctrica y la necesidad de desarrollar nuevas fuentes de energía, como las energías renovables. Estos son algunos de los factores que hacen evidente la necesidad de una reestructuración del sistema eléctrico de transporte y distribución.

Esta modernización de nuestras redes de transporte y distribución se basa en la implementación de sistemas automáticos inteligentes, que permitan un uso eficiente de la energía eléctrica que se genera, a través de una comunicación bidireccional entre el consumidor y el generador de la energía.

Los avances en el campo de las telecomunicaciones, en sensores y procesadores mucho más potentes, capaces de trabajar a mayores velocidades, combinados con la utilización de energías renovables harán que la generación, gestión y distribución sea más barata, eficiente y sostenible.

Todas estas motivaciones han llevado a lo que se conoce como *Smart Grids* o Redes Eléctricas Inteligentes.

4.2.1. Concepto de *Smart Grid*

El término *Smart Grid* se utiliza para referirse a las redes de distribución eléctricas "inteligentes". La red inteligente se define así porque son redes eléctricas donde la electricidad no solo va hacia un sentido, sino que es bidireccional. Ahora, las viviendas y distintos negocios pueden en un momento dado convertirse también en pequeños productores de electricidad y no solo consumidores. Así mejora la eficiencia y fiabilidad de la red eléctrica. [70]

Una red inteligente emplea productos y servicios innovadores junto con monitorización inteligente, técnicas de control, comunicaciones y tecnologías de autoajuste con el fin de: [72]

- Red eléctrica renovada e innovadora: mejorar la calidad del servicio, robustecer y automatizar la red, con el fin de obtener una red de transporte y distribución de calidad y minimizar las pérdidas en la misma.
- Un abastecimiento seguro: resolver el problema del agotamiento de las fuentes de energía actuales (combustibles fósiles), optimizando la conexión de las zonas con fuentes de energía renovables y minimizando costes. Tener capacidad de suministro de calidad adecuado a la era digital, permitiendo al usuario que lo demande disponer de cierto grado de calidad en su suministro energético para el uso en distintas aplicaciones.
- Reducir el impacto medioambiental: reducir emisiones de humos y gases ayudando a reducir el efecto invernadero, tratando de aumentar la responsabilidad social y la sostenibilidad.
- Gestionar la demanda energética, permitiendo a los consumidores gestionar sus consumos energéticos de una forma más eficiente.
- Permitir la autogestión durante incidencias, asegurando un flujo constante de energía en todos los puntos ante fallos o errores en la red.

□ Potenciar la participación activa de los consumidores, incentivando la generación local de energía y la entrega del exceso energético a la red en horas punta. Aportar a los consumidores mayor cantidad de información y opciones a la hora de seleccionar el suministro energético.

□ Variedad en modalidades de generación, permitiendo la coexistencia en la red de todo tipo de generadores, sin distinción de tamaño y tecnología. Variedad en las estrategias de almacenamiento, ayudado por la implementación de micro-redes y a la generación energética distribuida.

□ Facilitar el crecimiento de los mercados nacional y europeo, facilitando el transporte de energía a largas distancias, introduciendo elementos como el vehículo eléctrico, acrecentando el uso de las energías renovables y otros elementos en desarrollo.

En resumen, una *Smart Grid* se basa en el uso de sensores, comunicaciones, capacidad de computación y control, de forma que se mejora en todos los aspectos las funcionalidades del suministro eléctrico. Un sistema se convierte en inteligente adquiriendo datos, comunicando, procesando información y ejerciendo control mediante una realimentación que le permite ajustarse a las variaciones que puedan surgir en un funcionamiento real. Gracias a todas estas funcionalidades aplicadas a la red, es posible conseguir las características descritas anteriormente.

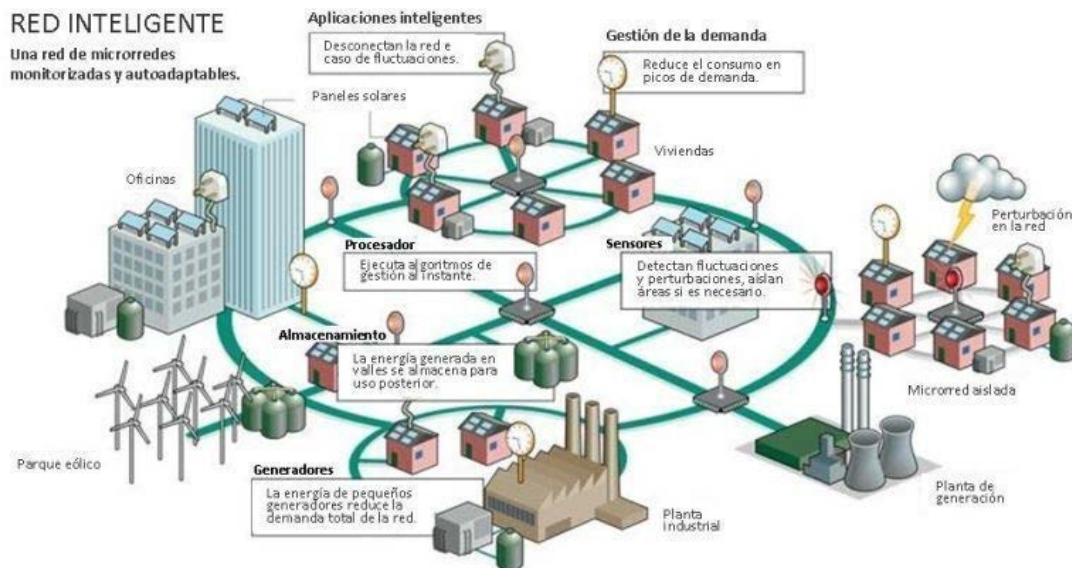


Figura 36: Esquema de una Smart Grid [71]

4.2.2. Principales características y aspectos de las *Smart Grids*

Generación Distribuida:

Un aspecto clave para conseguir esto es la generación distribuida que es la generación o el almacenamiento de energía eléctrica a pequeña escala, lo más cercana al centro de carga, con la opción de interactuar (comprar o vender) con la red eléctrica y, en algunos casos, considerando la máxima eficiencia energética. Otro aspecto sería el flujo bidireccional, donde la información proporcionada por los consumidores es utilizada por las compañías para permitir una operación más eficiente de la red eléctrica. Una red donde los usuarios pueden pasar a ser también proveedores gracias al desarrollo de las tecnologías de energía renovable (por ejemplo, mediante una instalación solar fotovoltaica conectada a la red).

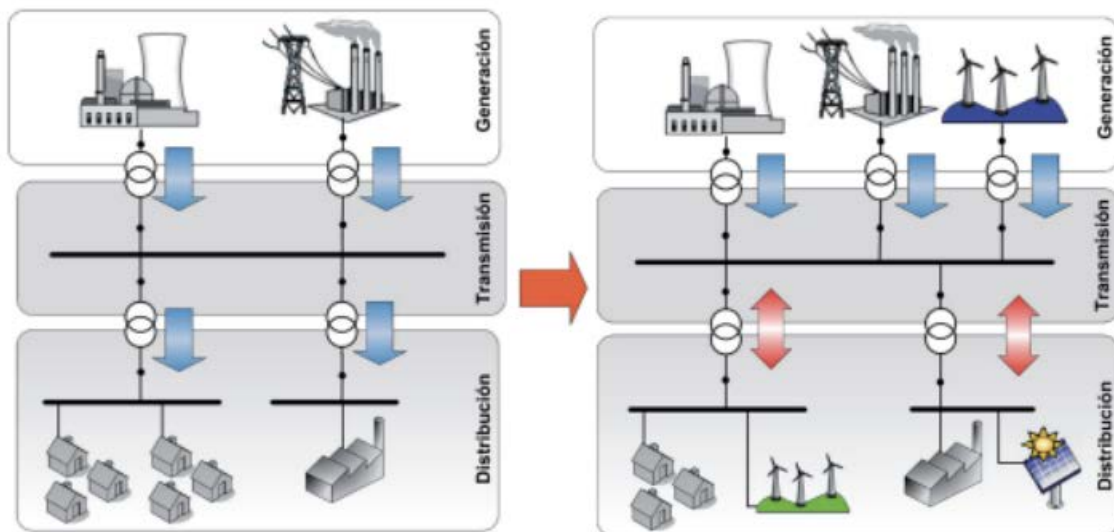


Figura 37: Comparación sistema de energía tradicional (izquierda) con sistema de distribución (derecha) [73]

Consumidor interactivo:

Ahora con las *Smart Grids* el cliente puede gestionar su propio consumo, ya que tiene un mayor seguimiento de la energía que se produce y entrega en su hogar. Esto se realiza a través de equipos instalados, contadores electrónicos y sistemas de gestión automatizados que se comunican entre si. A su vez el consumidor podrá ser capaz de generar su propia energía, la cual podrá ser devuelta a la red.

Seguridad:

Una *Smart Grid* podrá alertar de problemas potenciales incluso antes de que estos se produjeran, permitiendo la reconfiguración inmediata y evitarían interrupciones y cortes a gran escala. Además ofrecen seguridad cibernética. [74]

Eficiencia y fiabilidad

Las nuevas redes de contadores instalados a lo largo de la Red Inteligente surten de información a los operadores para que puedan ver lo que está sucediendo en cualquier momento, les permite saber con exactitud cuanta cantidad de energía se está demandando, evitando así alimentar a las líneas con más electricidad de la indispensable.

Los avances en cuanto a material de construcción, así como los nuevos materiales de conductores y transformadores, las distintas tecnologías de almacenamiento energético, pero sobre todo el análisis y la asimilación de la información obtenida entre los distintos puntos de control ayudarán a aumentar su eficiencia y fiabilidad. [75]

Energías renovables y vehículo eléctrico

Los métodos de almacenamiento de energía, las tecnologías actuales de envío de información, y los sistemas de previsión que incorporan las *Smart Grids* hacen posible la integración dentro de estas energías renovables y su óptimo funcionamiento. [76]

Otra característica que juega un papel importante en la implantación de las nuevas redes inteligentes es el vehículo eléctrico. Cuando se habla de los vehículos eléctricos se piensa en sus beneficios medioambientales, como las reducciones de las emisiones de CO₂ al impulsarse con energías renovables, menos contaminación acústica. Sin embargo, uno de los grandes potenciales del coche eléctrico es su uso como sistema de almacenamiento de energía, la cual puede ser consumida y gestionada por las *Smart Grids*. [76]

En este sentido se están implementado las siguientes tecnologías:

□□ V2G – *Vehicle to grid* (del vehículo a la red) Es un sistema en el cual la energía almacenada en el vehículo puede ser inyectada (vendida) a la red eléctrica. Se podría por lo tanto vender electricidad en horas pico, comprándola en horas valle, consiguiendo con ello un beneficio económico.

□□ V2H – *Vehicle to Home* (del vehículo al hogar) Esta tecnología es una variante del V2G, pero destinada a hogares, dando la posibilidad de usar la batería del coche como fuente de alimentación de la propia vivienda, permitiendo abaratar la factura de la luz y, por ejemplo, pudiendo usarse como generador de energía de emergencia ante interrupciones.

□□ V2B – *Vehicle to Building* (del vehículo al edificio)

Conceptualmente idéntico al V2H, pero aplicado a edificios o industrias, con esta tecnología una flota de vehículos conectados a un mismo edificio puede servir de fuente de alimentación.

4.2.2. Arquitectura y protocolos

Dentro de la nueva red eléctrica inteligente se pueden encontrar dos niveles diferenciados en su arquitectura, estos son: energía y comunicaciones.

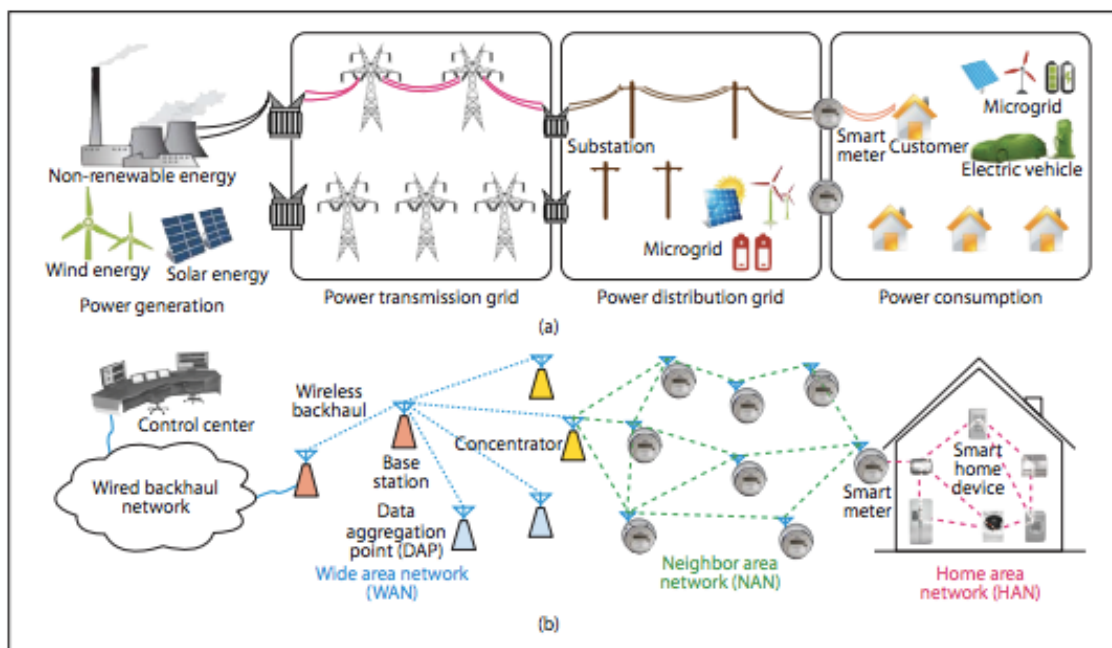


Figura 38: Arquitectura de una *Smart Grid* [77]

Con respecto al campo de la energía se distinguen cuatro áreas funcionales al igual que en la red eléctrica tradicional: generación, transporte, distribución, y consumo. Pero en las *Smart Grids* no toda la energía se proporciona a través de las centrales eléctricas tradicionales, ya que la energía puede ser también entregada por las fuentes renovables, por la gestión de demanda de los sistemas de almacenamiento y por la generación distribuida.

La arquitectura de las comunicaciones es un sistema que combina gran variedad de tecnologías (con la utilización de la IP como protocolo unificador de múltiples protocolos, dominios internos y externos). Dichas tecnologías requieren interfaces bien definidas, por ello se ha buscado la estandarización a través de estos tres subniveles:

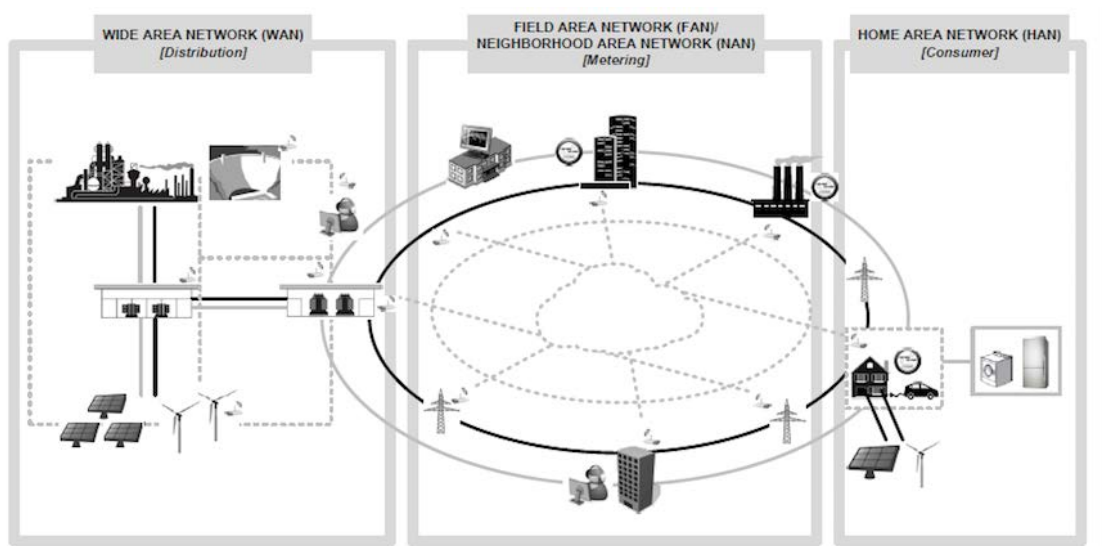


Figura 39: Arquitectura de comunicaciones de una *Smart Grid* [78]

□ HAN (*Home Area Network*): Es una red de comunicaciones de corto alcance que conecta electrodomésticos y otros dispositivos en el entorno de una vivienda o edificio para controlar la información permitiendo un mejor consumo de energía. El objetivo es que esta capa sea transparente a las superiores interactuando con ellas independientemente de las tecnologías utilizadas. Estas redes a su vez pueden estar conectadas a otros elementos auxiliares del cliente, como fuentes de energía renovable y dispositivos de almacenamiento. Dependiendo si nos encontramos ante un edificio o una empresa se requiere una BAN (*Building Area Network*) o una IAN (*Industrial Area Network*).

□ NAN (*Neighbor Area Network*): Este nivel proporciona el intercambio de la información de los contadores inteligentes (*smart meters*) entre los usuarios consumidores y las compañías eléctricas. Una NAN proporciona cobertura dentro de un área geográfica limitada que puede abarcar varios edificios.

□ WAN (*Wide Area Network*): Es la red de más alto nivel, cubre áreas más amplias e integran por lo general varias redes de menor tamaño. Recopila datos e información procedentes de la NAN y se encarga de transmitirlos recorriendo largas distancias, a compañías eléctricas, estaciones de distribución de energía, subestaciones, redes de distribución y centros de control.

4.2.3. Integración de sistemas de almacenamiento en *Smart Grids*

Veremos con ejemplos de proyectos como los sistemas de almacenamiento se integran en las *Smart Grids*.

4.2.3.1. Proyecto TILOS

TILOS es una pequeña isla del archipiélago griego del Dodecaneso, al noroeste de Rodas. Parque natural y con tan solo 500 habitantes, está camino de convertirse en la primera isla del Mediterráneo mantenida exclusivamente por energías renovables. Hasta ahora la población local de Tilos cubría sus necesidades energéticas a través de un cable submarino que la conectaba con una planta generadora de electricidad en la isla de Kos. Los defectos en esta conexión provocaban a menudo cortes de electricidad de varias horas en toda la isla, algo que dificultaba enormemente la vida de los lugareños.

Para hacer frente a este complicado sistema de abastecimiento eléctrico, se puso en marcha el Proyecto TILOS, (*Technology Innovation por the Local scale Optimum integration of battery Energy Storage*), con el objetivo de desarrollar y poner en marcha un prototipo de planta generadora y almacenadora de energía eléctrica híbrida, basada en las energías eólica y fotovoltaica, capaz de cubrir las necesidades de suministro eléctrico insular. Es decir, se trata de un sistema de almacenamiento de energía combinado con microredes eléctricas inteligentes.

Este proyecto cuenta con la participación de 15 empresas e instituciones de investigación procedentes de Alemania, Francia, Reino Unido, Suecia, Italia, Grecia y España, bajo la coordinación de la Universidad del Pireo en Atenas y tiene una duración de cuatro años, extendiéndose hasta 2019. Cuenta con un presupuesto de 11 millones de euros financiados por la Comisión Europea.

Uno de los puntos clave del proyecto es el almacenamiento de energía, que se llevará a cabo con una batería de sodio, de gran capacidad y duración, diseñada para funcionar en condiciones climáticas extremas. La isla griega se convierte en el banco de pruebas para desarrollar el sistema de almacenamiento energético con renovables, junto con un modelo de control de redes inteligentes, que demostrará la viabilidad técnica y económica de este sistema en territorios insulares.

El núcleo del sistema estará formado por una turbina eólica de 800 kW y 160 kW de energía fotovoltaica, provisto de un acumulador de energía con capacidad para 2.88MWh y una potencia nominal de salida de 800 kW. Para validar los algoritmos de gestión de la energía del sistema, el equipo de TILOS ha desarrollado un simulador de microrred.[80][81]

4.2.3.2. Proyecto Nice Grid

El distrito de Carros, en las afueras de Niza, fue elegido como centro de pruebas del proyecto en función de varios criterios: su localización en la periferia de la red de transmisión francesa, lo que aumenta el riesgo de cortes de suministro, la gran

disponibilidad de recurso solar, y la amplia variedad de tipos de consumidores, con un gran parque de negocios, barrios residenciales y viviendas. [82]

El sistema puesto en marcha por los socios del consorcio Nice Grid se basa en tres factores clave para compensar con éxito la oferta y la demanda en el distrito:

- ☐ Predicción de la demanda del día siguiente para comparar la producción fotovoltaica con el consumo.
- ☐ Almacenamiento en baterías en nodos clave de la red para contrarrestar cualquier intermitencia en el suministro de energía solar y absorber los picos de consumo.
- ☐ Incentivar a los consumidores residenciales e industriales a gestionar mejor su consumo.

El proyecto Nice Grid utiliza comunicaciones innovadoras, producción de energía solar y tecnologías de almacenamiento para construir en Carros una red inteligente a una escala significativa. El proyecto se ha implementado en la ciudad y en su zona industrial. Las instalaciones solares con las que ya contaba la red, se han complementado con:

- ☐ Instalaciones solares adicionales, hasta llegar a un total de 200 instalaciones, con una potencia agregada de 2,5 MWp.
- ☐ Baterías de ion-litio instaladas en los hogares de clientes voluntarios, en la red de distribución y en la subestación primaria, llegando a una capacidad de almacenamiento total de 2 MW.
- ☐ Equipos que permiten la desconexión voluntaria de cargas dispersas de calefacción, agua caliente y sistemas de aire acondicionado, así como otras cargas eléctricas en edificios residenciales y comerciales.
- ☐ Agentes locales inteligentes para gestionar recursos energéticos dispersos a nivel de cada componente.
- ☐ Software inteligente para gestión avanzada de la red.

4.2.3.3. Proyecto Walkiria

El proyecto Walkiria consiste en el desarrollo de una plataforma de gestión integral de la carga, que pueda integrarse en las redes energéticas y *Smart Grids*, y que permita la comunicación entre todos los agentes de la distribución eléctrica. Con ello se

proporcionará información a los agentes del mercado eléctrico sobre casos de uso, oferta y demanda en el marco del vehículo eléctrico, facilitando además su integración en la sociedad a través del desarrollo de un sistema inteligente integral de gestión de carga de vehículos eléctricos, en el entorno de una red eléctrica sostenible.

El objetivo principal del proyecto Walkiria ha sido desarrollar un sistema inteligente integral de gestión de recarga del vehículo eléctrico (VE), en el entorno de una red eléctrica sostenible. El sistema está soportado por una plataforma tecnológica que permite las funcionalidades de gestión dinámica y en tiempo real de cargas, integrando las comunicaciones necesarias para el funcionamiento de las redes inteligentes (con todos los agentes implicados en el suministro eléctrico) y diversos sistemas de generación distribuida asociados a microrredes.

El Proyecto Walkiria realizado a través de un consorcio formado por Telecontrol S.T.M, el Instituto Tecnológico de la Energía (ITE), Zigor-Corporación S.A, Fenie Energía, Nomantica y Amayuelas, ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, en el Programa INNPACTO 2012.

Walkiria gestiona la recarga de VE tanto en los puntos de recarga fijos convencionales, como en el novedoso sistema de recarga móvil PREMISA, que permite la recarga del VE desde cualquier punto de suministro eléctrico. [83][84]

4.3. Conclusiones

En este proyecto se ha estudiado el concepto de *Smart Grid*, habiendo analizado para ello, la estructura de las redes de distribución y transporte convencionales, las motivaciones por las cuales surge la idea de la red inteligente, las principales características y elementos más importantes que éstas engloban y la integración de sistemas de almacenamiento. Resultando las siguientes conclusiones:

El aumento de la demanda energética, los compromisos que se han establecido para el año 2020 en la Unión Europea para preservar el medio ambiente con una mayor integración de las fuentes de energía renovables y la introducción de una red de generación distribuida han provocado que la red eléctrica convencional evolucione hacia una red eléctrica inteligente llamada *Smart Grid*.

Gracias a la integración de las *Smart Grids* las empresas del sector eléctrico podrán reducir sus pérdidas controlando y monitorizando los dispositivos y elementos implicados en la generación y transporte de energía. Y, gracias a los datos aportados por los medidores inteligente instalados en los puestos de consumo se mejorará la eficiencia

energética. De esta manera las compañías podrán ofrecer mejores servicios a sus clientes, como la autogestión de incidencias evaluando en tiempo real el suministro.

Con estas redes inteligentes los consumidores o usuarios finales pasarán de ser pasivos a actores activos del sistema eléctrico, gracias a la introducción de nuevos servicios que permiten al consumidor participar activamente, con el fin de fomentar un uso más responsable de la energía y modificar conductas de comportamiento para reducir el consumo.

Como se ha podido ver las *Smart Grids* son uno de los principales intereses energéticos a nivel mundial. En los últimos años y en la actualidad se han creado multitud de consorcios que están desarrollando muchos y muy diversos proyectos de investigación tecnológica en los cuales se están integrando tecnologías de almacenamiento, las más usuales suelen ser las baterías.

5. BIBLIOGRAFIA

5.1. Bibliografía utilizada

- [1] <http://dle.rae.es/?id=FGD8otZ>
- [2] IDAE, (2011). Evolución tecnológica y prospectiva de costes de las energías renovables. Recuperado de http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e2_tecnologia_y_costes_7d24f737.pdf
- [3] <https://www.ecogestos.com/cambio-climatico-y-la-energia-primaria-intermedia-y-final/>
- [4] Instituto tecnológico de canarias, (2008). Energías renovables y eficiencia energética. Recuperado de <http://www.cienciacanaria.es/files/Libro-de-energias-renovables-y-eficiencia-energetica.pdf>
- [5] <https://www.blogenergiasostenible.com/que-es-la-energia-sostenible/>
- [6] *New Energy Outlook 2016*, <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/>
- [7] <https://www.energias-renovables.com/panorama/la-dependencia-energetica-de-espana-sigue-casi-20170321>
- [8] Crisis energética, <https://lacrisisenergetica.wordpress.com/2013/07/13/previsiones-resumidas-de-la-produccion-mundial-de-petroleo-y-gas-entre-1900-y-2100/>
- [9] *IEA World Energy Outlook* <http://www.worldenergyoutlook.org/weo2011/>
- [10] MORAN, J.M. AND M.D. MORAN. 1994. *Meteorology: The atmosphere and the science of weather*. Recuperado de <http://www.cricyt.edu.ar/enciclopedia/terminos/EfecInv.htm>
- [11] https://es.wikipedia.org/wiki/Calentamiento_global
- [12] The national Academies Press. *Understanding Climate Change Feed-backs*. Recuperado de <https://www.nap.edu/download/10850#>
- [13] Acuerdo de Paris, https://es.wikipedia.org/wiki/Acuerdo_de_Par%C3%ADs
- [14] REN21 (Informe 2016), http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_KeyFindings_SPANISH.pdf y

http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_Full_Report.pdf

- [15] Definición Biomasa APPA http://www.appa.es/04biomasa/04que_es.php
- [16] IDAE, <http://www.idae.es/conozcanos/quienes-somos>
- [17] https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_renovable_en_Espa%C3%B1a#Consumo_final_de_energ.C3.ADas_renovables
- [18] Ministerio de energía,
http://www.minetad.gob.es/energia/balances/Balances/LibrosEnergia/La_Energ%C3%ADa_2014.pdf
- [19] El sistema eléctrico español, avance 2016,
http://www.ree.es/sites/default/files/downloadable/avance_informe_sistema_elec_trico_2016.pdf
- [20] https://es.wikipedia.org/wiki/Almacenamiento_de_energ%C3%ADa
- [21] Red eléctrica de España, <http://www.ree.es/es/red21/almacenamiento-energetico>
- [22] Red eléctrica de España, <http://www.ree.es/es>
- [23] <http://www.ree.es/es/actividades/demanda-y-produccion-en-tiempo-real>

Almacenamiento mecánico:

Aire comprimido

- [24] <http://energystorage.org/compressed-air-energy-storage-caes>
- [25] http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Englische_Infos/projekt_0507_engl_internetx.pdf
- [26] http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno12/almacena/Almacenamiento_Pneumatic.html
- [27] <https://twenergy.com/a/ejemplos-de-la-tecnologia-por-aire-comprimido-como-sistema-de-almacenamiento-energetico-caes-2021>
- [28] Estudio del almacenamiento de energía mediante aire comprimido. Adrià Lladó Sánchez (2015)

Hidráulica de bombeo

- [29] <https://www.fenercom.com/pages/pdf/formacion/09-10-2013-Almacenamiento%20de%20Energia%20IV/01-Almacenamiento-de-Energia-mediante-bombeo-Iberdrola>

- [30] https://www.reunionanualsne.es/doc/40/ponencias/plenarias/plen1_03.pdf
- [31] <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-del-Almacenamiento-de-Energia-fenercom-2011.pdf>
- [32] <http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1342-central-bombeo>
- [33] <http://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-centrales-hidroelectricas-de-espana/>

Volantes de inercia

- [34] <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-del-Almacenamiento-de-Energia-fenercom-2011.pdf>
- [35] <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6415/01LLrp01de01.pdf;jsessionid=61E45F1AAD8DBD319298AD9B0FC9FA66?sequence=1>
- [36] <https://twenergy.com/a/funcionamiento-del-volante-de-inercia-como-sistema-de-almacenamiento-de-energia-por-volante-de-inercia-2061>
- [37] http://www.sc.ehu.es/sbweb/energias-renovables/temas/almacenamiento_1/almacenamiento_1.html

Almacenamiento electromagnético

Almacenamiento en supercondensadores

- [38] <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4740/fichero/2.+Baterias+y+Supercondensadores.pdf>
- [39] <http://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/1/349/1259/6572/6589/77754.pdf>
- [40] http://www.cinergia.coop/sites/default/files/2009_03_aei_2009_ultracaps_j_rafecas_0.pdf
- [41] Estudio de sistemas de almacenamiento de energía basados en baterías y supercondensadores, Álvaro Cortés Sánchez-Migallón (2016)
- [42] <https://es.wikipedia.org/wiki/Supercondensador>
- [43] <https://twenergy.com/a/que-son-los-supercondensadores-y-cuales-son-sus-aplicaciones-2063>

Almacenamiento en imanes conductores

- [44] <http://www.climatetechwiki.org/technology/jiqweb-ee>
- [45] <http://energystoragesense.com/superconducting-magnetic-energy-storage-smes/>
- [46] <http://www.superpower-inc.com/content/superconducting-magnetic-energy-storage-smes>
- [47] <http://www.prizz.fi/sites/default/files/tiedostot/linkki2ID693.pdf>

Almacenamiento térmico

- [48] Estudios fisico-químicos y de corrosión a elevada temperatura para el diseño de nuevos fluidos almacenadores de energía en centrales solares de concentración. Ángel Gabriel Fernández Díaz-Carralero (2013)
- [49] <http://maikelnai.naukas.com/2009/03/25/como-funciona-una-solar-termica-con-almacenamiento-por-sales-fundidas/>
- [50] Almacenamiento térmico en aplicaciones solares de concentración de alta temperatura. David Almagro Cabrera (2012)
- [51] <https://www.fenercom.com/pages/pdf/formacion/09-10-2013-Almacenamiento%20de%20Energia%20IV/04-Almacenamiento-Subterraneo-de-Energia-Termica-IFTEC>
- [52] <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-del-Almacenamiento-de-Energia-fenercom-2011.pdf>

Almacenamiento electroquímico

Almacenamiento de hidrogeno

- [53] El hidrogeno y la energía. José Ignacio Linares Hurtado Beatriz Yolanda Moratilla Soria.
- [54] Sistemas de acumulación de energía eléctrica para centrales de generación hidráulicas fluyentes. Jose Antonio Gallego Martín (2014).
- [55] <http://www.fundaciongasnaturalfenosa.org/wpcontent/uploads/2015/12/%C3%1frica-Castro.pdf>
- [56] http://www.sotaventogalicia.com/recursos/custom/area_tecnica/proyectos/planta_h2/esp/docs/doc_003.pdf

Pila de combustible

- [57] El hidrogeno y la energía. José Ignacio Linares Hurtado Beatriz Yolanda Moratilla Soria
- [58] Diseño y Fabricación de una Pila de Combustible de Hidrógeno de Baja Potencia. Javier Almarza Cano (2010)
- [59] http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-ojn/ceramicas-y-vidrios/bloque-iv/pilas_de_combustible-1.pdf
- [60] <http://naukas.com/2012/03/01/le-puede-salir-agua-a-tu-futuro-smartphone-pues-apple-apuesta-por-usar-pilas-de-hidrogeno/>

Almacenamiento en baterías

- [61] <http://www.cener.com/documentacion/microrred-ficha-407.pdf>
- [62] Estudio de un sistema de almacenamiento de energía eólica por medio de baterías. Samuel Velez Moreno (2012).
- [63] <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70692/fichero/10+Baterias+para+Almacenamiento+de+Energ%C3%ADa.pdf>
- [53] Sistemas de acumulación de energía eléctrica para centrales de generación hidráulicas fluyentes. Jose Antonio Gallego Martín (2014).
- [63] <http://www.ree.es/es/red21/idi/proyectos-idi/proyecto-almacena>
- [64] <https://www.motorpasion.com/tag/think-city>
- [65] <https://www.ecointeligencia.com/2014/02/almacenamiento-energia-4/#lightbox/1/>
- [66] https://www.tesla.com/es_ES/powerwall
- [67] https://www.tesla.com/es_ES/solarroof
- [68] <http://ecoinventos.com/rastore/>

Smart Grids

- [69] <http://www.energiaysociedad.es/manenergia/1-1-aspectos-basicos-de-la-electricidad/>

- [70] <http://www.eoi.es/blogs/merme/gestion-y-operacion-de-la-red-electrica-esquema-de-la-red-electrica-de-espana-asimetria-peninsular-generacion-y-consumo-conexiones-internacionales-3/>
- [71] http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/smart-city/smart-grid
- [72] <https://www.ecointeligencia.com/2014/02/smart-grid-fundamentos/#lightbox/1/>
- [73] Smart Grid y la evolución de la red eléctrica (2011).
- [74] <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=411534385004>
- [75] http://www.gridwise.org/smartgrid_security.asp
- [76] http://www.gridwise.org/smartgrid_energyeffi.asp
- [77] <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-del-Vehiculo-Electrico-II-fenercom-2015.pdf>
- [78] Challenges and research opportunities in wireless communication networks for smart grid. IEEE Wireless Communications. [SEP] Quang-dung Ho, Yue Gao, Y Tho Le-Ngoc (2013)
- [79] <http://wiblus.blogspot.com.es/2014/11/vision-de-la-ieee-sobre-las.html>
- [80] <http://www.tiloshorizon.eu/>
- [81] <https://www.smartgridsinfo.es/2016/08/11/almacenamiento-energetico-local-con-proyecto-tilos>
- [82] http://www.futureenergyweb.es/pdf/articulos/2014-04/FuturEnergy-Abril14_27-30.pdf
- [83] <http://www.hibridosyelectricos.com/articulo/sector/finalizan-pruebas-proyecto-walkiria-vehiculos-electricos/20150620181909009648.html>
- [84] <http://www.ite.es/project/walkiria/>

5.2. Índice de figuras

Figura 1	Pag. 7	Esquema de fuentes energéticas y usos.
Figura 2	Pag. 11	Estimación de la producción mundial de Petróleo crudo y Líquidos del Gas Natural (NGL).
Figura 3	Pag. 13	Histórico y previsiones de consumo de energía primaria en el mundo.
Figura 4	Pag. 15	Media global del cambio de temperatura en la tierra y el mar en 1880-2016, respecto a la media de 1951-1980. La línea negra es la media anual y la roja la media móvil de cinco años.
Figura 5	Pag. 16	Predicción de calentamiento global sin reducción de emisiones.
Figura 6	Pag. 18	Porcentaje de cobertura de las EERR en relación al consumo mundial de energía primaria.
Figura 7	Pag. 18	Porcentaje de cobertura de las EERR en relación a la producción de electricidad a nivel mundial.
Figura 8	Pag. 19	Porcentaje de crecimiento de las diferentes EERR y de producción de biocombustible.
Figura 9	Pag. 20	5 primeros países en capacidad o generación para las diferentes tecnologías.
Figura 10	Pag. 21	Capacidades de energía renovable instalada en el mundo, Unión Europea (UE-28), BRICS y los 7 países líderes.
Figura 11	Pag. 21	Evolución de la capacidad eólica instalada desde 2005 a 2015.
Figura 12	Pag. 22	Incremento de la capacidad eólica de los 10 países líderes.
Figura 13	Pag. 22	Evolución de la capacidad solar fotovoltaica instalada desde 2005 a 2015.

Figura 14	Pag. 23	Incremento de la capacidad solar fotovoltaica de los 10 países líderes.
Figura 15	Pag. 24	Evolución del porcentaje de cobertura del consumo final bruto de las energías renovables.
Figura 16	Pag. 24	Consumo energía primaria en España en 2014 (sin incluir saldo eléctrico).
Figura 17	Pag. 25	Consumo energía final en España en 2014.
Figura 18	Pag. 25	Evolución de la producción de energía eléctrica renovable y no renovable en España.
Figura 19	Pag. 26	Evolución de la producción de energía renovable en España.
Figura 20	Pag. 30	Curva de generación y demanda en tiempo real en el sistema eléctrico español.
Figura 21	Pag. 31	Detalle de la estructura de generación en tiempo real del sistema eléctrico español.
Figura 22	Pag. 32	Garantía de capacidad asociada a diferentes tecnologías de generación eléctrica.
Figura 23	Pag. 33	Tecnologías de almacenamiento en la red eléctrica.
Figura 24	Pag. 34	Esquema almacenamiento energía mediante aire comprimido.
Figura 25	Pag. 37	Esquema central hidroeléctrica de bombeo.
Figura 26	Pag. 39	Esquema de elementos de un volante de energía.
Figura 27	Pag. 44	Grupo de ultracondensadores.
Figura 28	Pag. 45	Circuito equivalente de un ultracondensador.
Figura 29	Pag. 45	Curva carga/descarga de un ultracondensador.
Figura 30	Pag. 49	Esquema de un superconductor.

Figura 31	Pag. 52	Ejemplo de almacenamiento de hidrógeno a través de un parque eólico.
Figura 32	Pag. 55	Esquema funcionamiento de una pila de combustible.
Figura 33	Pag. 56	Características principales pilas de combustible.
Figura 34	Pag. 66	Esquema de una batería de flujo redox.
Figura 35	Pag. 74	Esquema de la red eléctrica en España.
Figura 36	Pag. 76	Esquema de una <i>Smart Grid</i>
Figura 37	Pag. 78	Comparación sistema de energía tradicional (izquierda) con sistema de distribución (derecha).
Figura 38	Pag. 80	Arquitectura de una <i>Smart Grid</i> .
Figura 39	Pag. 81	Arquitectura de comunicaciones de una <i>Smart Grid</i> .