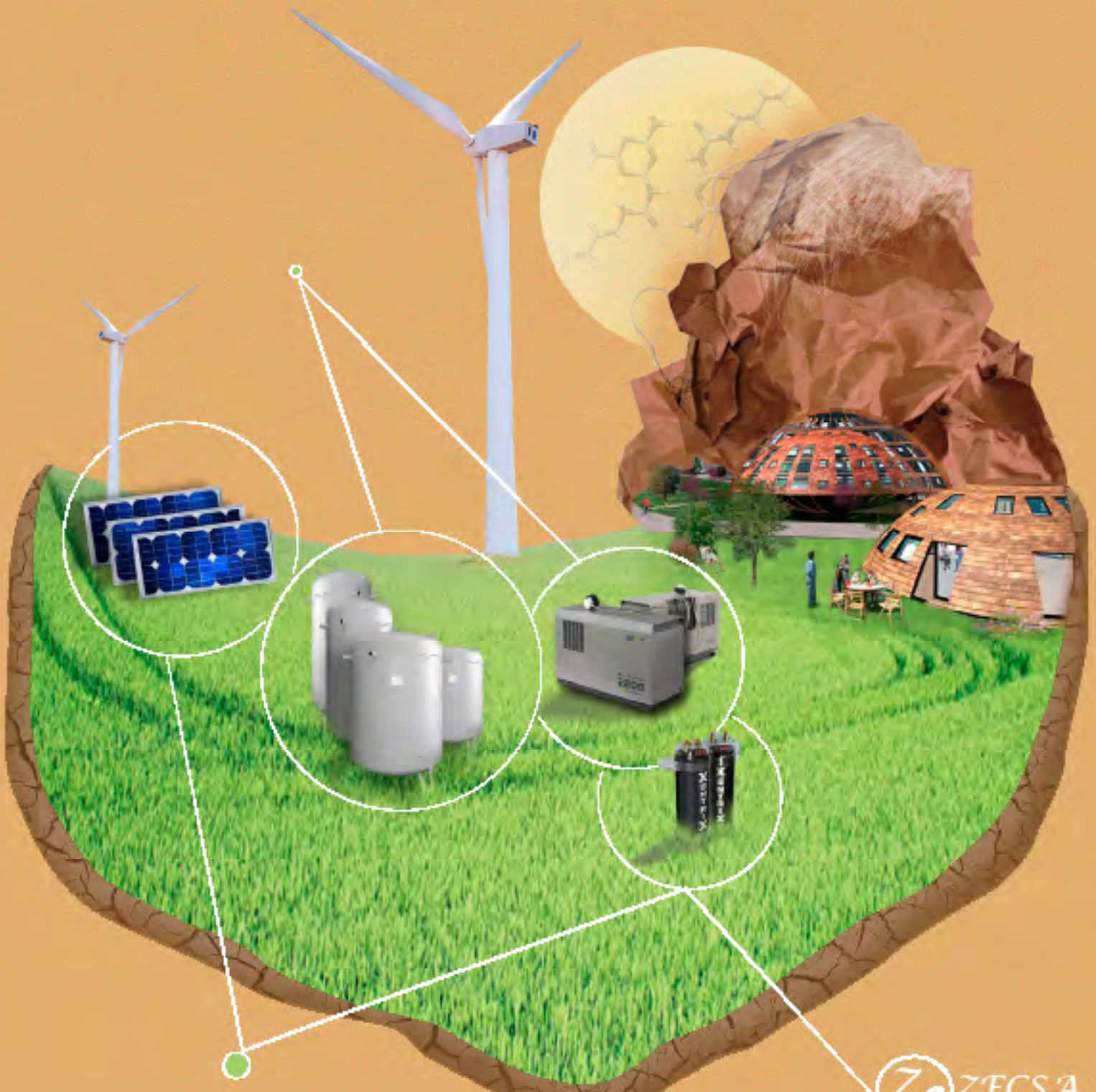
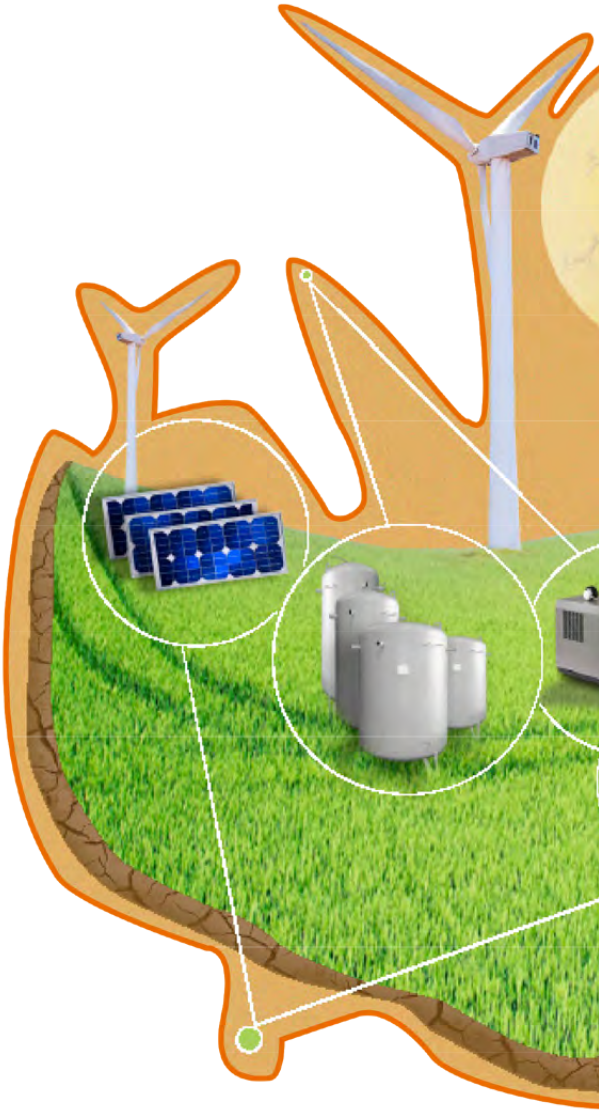
TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO



ZECSA
Zona Eólica Canaria S.A.

TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO

ZECSA
Zona Eólica Canaria S.A.



Todos los derechos reservados.
Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra sólo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (arts. 270 y sgts. Código Penal).

© ZONA EÓLICA CANARIA S.A.
Calle Veintinueve de Abril, Nº 30 Bajo
T.M. de Las Palmas de Gran Canaria
35007 – Las Palmas
España
ISBN-13: 978-84-617-4362-9

Nota sobre enlaces a páginas webs ajenas: este libro puede contener enlaces a sitios webs gestionados por terceros y ajenos a ZONA EÓLICA CANARIA S.A., que se incluyen solo con la finalidad informativa. ZONA EÓLICA CANARIA S.A. no asume ningún tipo de responsabilidad por los daños y perjuicios derivados del uso de los datos personales que pueda hacer un tercero encargado del mantenimiento de las páginas web ajenas a ZONA EÓLICA CANARIA S.A. y del funcionamiento, accesibilidad o mantenimiento de los sitios web no gestionados por ZONA EÓLICA CANARIA S.A. Las referencias se proporcionan en el estado en el que se encuentran en la fase de redacción y publicación sin garantías, expresas o implícitas, sobre la información que se faciliten en las mismas.

2016



ÍNDICE

1. Introducción 10

2. Almacenamiento de energía 12

3. Elección del método adecuado 14

4. Sistemas de almacenamiento de energía 16

4.1. Almacenamiento mecánico 17
4.1.1. Bombeo hidráulico 17
4.1.1.1. Bomba hidráulica 18
4.1.1.2. Acumulador hidráulico 22
4.1.1.3. Conclusiones 24
4.1.1.4. Proyectos relacionados 24
4.1.2. Aire Comprimido 25
4.1.2.1. Producción del aire comprimido 26
4.1.2.2. Acumulador de aire comprimido 27
4.1.2.3. Instalaciones CAES 32
4.1.2.4. Calculador de fugas de aire comprimido 35
4.1.2.5. Proyectos relacionados 35
4.1.3. Volantes de inercia 36
4.1.3.1. Baterías inerciales 36
4.1.3.2. Fluctuaciones 37
4.1.3.3. Acumuladores inerciales 38
4.1.3.4. Proyectos relacionados 38
4.1.4. Bibliografía almacenamiento mecánico 38
4.2. Almacenamiento químico y electroquímico 39
4.2.1. Hidrógeno 39
4.2.1.1. Características 39
4.2.1.2. Almacenamiento de hidrógeno gas comprimido 41
4.2.1.3. Hidrógeno líquido criogénico 42
4.2.1.4. Almacenamiento sólido de hidrógeno 43
4.2.1.5. Comparación de los sistemas 47
4.2.1.7. Proveedores 49
4.2.1.8. Proyectos relacionados 50
4.2.2. Baterías 53
4.2.2.1. Introducción 53
4.2.2.2. Celda electroquímica 53
4.2.2.2.1. Celda voltaica (o pila voltaica o celda galvánica o pila galvánica) 54
4.2.2.2.1.1. Celdas primarias 54
4.2.2.2.1.2. Celdas secundarias 56
4.2.2.2.1.3. Baterías de flujo 62
4.2.2.2.1.4. Pilas de combustible 66
4.2.2.3. Proyectos relacionados 67
4.2.2.3.1. Con energía eólica 67
4.2.2.3.2. Otros 70
4.2.2.4. Costos 72
4.2.3. Bibliografía almacenamiento químico y electroquímico 73
4.3. Almacenamiento eléctrico y magnético 75
4.3.1. Condensadores 75
4.3.1.1. Tipos 75

4.3.1.1.1. Condensador de aire 75
4.3.1.1.2. Condensador de mica 75
4.3.1.1.3. Condensador de papel 76
4.3.1.1.4. Condensador electrolítico 76
4.3.1.1.5. Condensador de poliéster, de policarbonato y de polipropileno 76
4.3.1.1.6. Condensador cerámico 76
4.3.1.1.7. Proveedores 76
4.3.1.2. Supercondensadores 77
4.3.1.2.1. Tipos 78
4.3.1.2.2. Aplicaciones 79
4.3.1.2.3. Costos 80
4.3.1.2.4. Proyectos relacionados 81
4.3.1.2.5. Proveedores 83
4.3.2. Campos magnéticos 84
4.3.2.1. Bobinas superconductoras 84
4.3.2.1.1. Tipos 85
4.3.2.1.2. Costos 86
4.3.2.1.3. Proyectos relacionados 86
4.3.3. Bibliografía almacenamiento eléctrico y magnético 89
4.3.3.1. Condensadores 89
4.3.3.2. Campos magnéticos 90
4.4. Almacenamiento térmico 90
4.4.1. Calor sensible y calor latente 90
4.4.1.1. Almacenamiento por calor sensible o capacidad calorífica 90
4.4.1.1.1. Almacenamiento en agua 91
4.4.1.1.2. Almacenamiento en piedras o rocas 91
4.4.1.2. Almacenamiento por calor latente o cambio de fase 91
4.4.1.2.1. Almacenamiento de energía térmica mediante cambio de fase como estrategia de ahorro en sistemas de climatización 92
4.4.1.2.2. Beneficios de los sistemas de almacenamiento de calor latente basados en materiales de cambio de fase 93
4.4.2. Almacenamiento en estanques solares 94
4.4.3. Generación directa de vapor para tecnología de colectores cilindro parabólicos 95
4.4.4. Energía OTEC 96
4.4.5. Centrales 97
4.4.5.1. Horno solar de Odeillo 97
4.4.5.2. Ps10, la primera torre comercial del mundo 98
4.4.6. Fabricantes de Acumuladores Solares 99
4.4.7. Proyectos relacionados 100
4.4.8. Bibliografía almacenamiento térmico 102

5. Comparación de los distintos sistemas de almacenamiento, grado de desarrollo de las mismas y los costes 104

5.1. Almacenamiento para proveer energía de base al sistema eléctrico con una estimación de suministro de 8 horas 107
5.2. Sistema de almacenamiento distribuido con una estimación de suministro de 4 horas 108
5.3. Sistemas para mejorar la calidad de la potencia servida por la red eléctrica con una estimación de suministro de 20 segundos 108

6. Software relacionados 110

ÍNDICE DE IMÁGENES

Figura 1: almacenamiento de energía 13
Figura 2: sistemas de almacenamiento de energía 17
Figura 3: instalación de batería central 19
Figura 4: bombeo hidráulico tipo jet 20
Figura 5: bombeo hidráulico tipo pistón 21
Figura 6: acumuladores hidráulicos 22
Figura 7: modelos de acumuladores 23
Figura 8: instalaciones CAES 26
Figura 9: esquema tipo de compresores 27
Figura 10: esquema almacenamiento de energía en aire comprimido 29
Figura 11: dispositivo de almacenamiento de energía en aire comprimido 30
Figura 12: sistema de baterias de aire comprimido 31
Figura 13: PNU Power 1MVA 31
Figura 14: sistema de PNU Power 1MVA 32
Figura 15: esquema General Instalación CAES 33
Figura 16: instalaciones CAES en parques eólicos 34
Figura 17: volantes de inercia 36
Figura 18: componentes nacelle turbina eólica 37
Figura 19: energía por unidad de peso (kg) de distintos combustibles 40
Figura 20: energía por unidad de volumen (l) de distintos combustibles 40
Figura 21: comparativa de masa entre distintos combustibles 40
Figura 22: fórmula química del hidrógeno 41
Figura 23: tipos de estructuras 41
Figura 24: comparativa entre hidrógeno líquido e hidrógeno gaseoso 42
Figura 25: tanque de hidrógeno líquido 43
Figura 26: armazón de un tanque de hidrógeno líquido 43
Figura 27: tipos de almacenamiento sólido 44
Figura 28: plano grafítico enrollado 45
Figura 29: molécula 49
Figura 30: baterías de flujo 62
Figura 31: coste por día y descarga 64
Figura 32: coste por potencia vs coste de energía 64
Figura 33: densidad energética 65
Figura 34: proceso de producción de hidrógeno a partir de energía eólica 68
Figura 35: vista panorámica del campus de baterías 69
Figura 36: aerogenerador Gamesa 69
Figura 37: baterías 70
Figura 38: coste proyectado del transporte de pila de combustible 73
Figura 39: costes de fabricación de pilas de combustible 73
Figura 40: relación entre tecnologías existentes y comparación de energía almacenada 78
Figura 41: supercondensadores 79
Figura 42: supercondensador de papel 81
Figura 43: almacenamiento en forma de campo magnético 88
Figura 44: almacenamiento de energía térmica 92
Figura 45: almacenamiento de energía térmica y control de temperatura 93
Figura 46: estanque solar 94
Figura 47: instalación de prueba de DSG 95
Figura 48: proyecto Carboneras 96
Figura 49: energía OTEC 96
Figura 50: horno solar de Odeillo 97
Figura 51: alzado Edificio Horno Solar 98

Figura 52: planta solar equipada con heliostatos **98**
Figura 53: esquema de funcionamiento de una planta solar **99**
Figura 54: sistema de ventilación/climatización **99**
Figura 55: depósitos de almacenamiento **99**
Figura 56: diagrama del grado de desarrollo de las tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica **105**
Figura 57: diagrama de los costes en función de los requerimientos de potencia y energía **106**
Figura 58: diagrama de almacenamiento base **107**
Figura 59: diagrama sistema de almacenamieto distribuida **108**
Figura 60: diagrama optimización sistema de almacenamiento **108**
Figura 61: esquema de sistemas de almacenamiento energético **111**
Figura 62: esquema de sistemas aislados de la red eléctrica **111**

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: centrales de bombeo españolas **20**
Tabla 2: costos AIR DRUPS **34**
Tabla 3: tipos de fluctuaciones **39**
Tabla 4: características del hidrógeno **41**
Tabla 5: factor de compresibilidad **42**
Tabla 6: comparación de sistemas de almacenamiento químico según estado **49**
Tabla 7: densidades energéticas **50**
Tabla 8: métodos y fenómenos de almacenamiento de hidrógeno **50**
Tabla 9: comparativa energética de combustibles **51**
Tabla 10: información sobre voltaje y densidad de varios compuestos **65**
Tabla 11: estado del arte de las baterías **67**
Tabla 12: comparación de las tecnologías de pila de combustible **69**
Tabla 13: costos de capital estimados de tecnologías de almacenamiento de energía **82**
Tabla 14: comparación entre súper condensadores y una batería de iones de litio **83**
Tabla 15: características de potencia, tiempo de descarga, eficiencia y vida útil de sistemas de almacenamiento de energía eléctrica **107**
Tabla 16: coste de recarga **108**



1

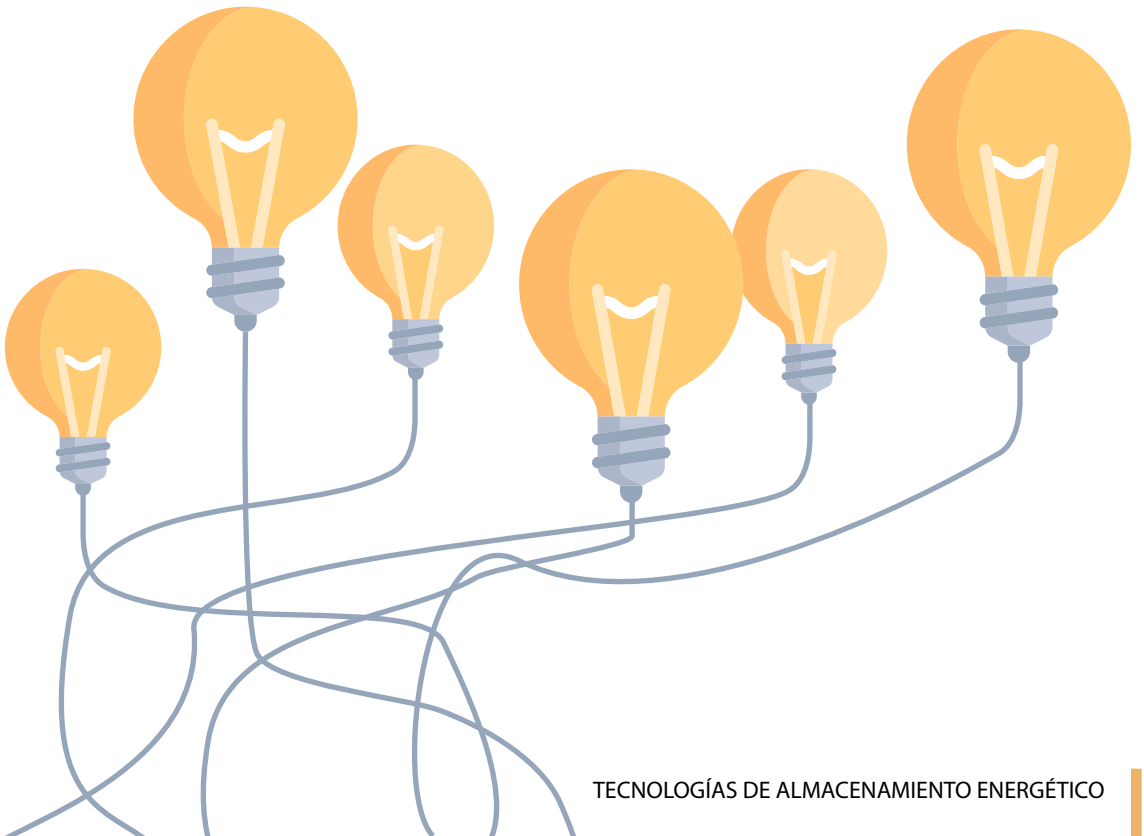
INTRODUCCIÓN



La generación de energía eléctrica es una actividad humana básica, ya que está directamente relacionada con los requerimientos actuales del hombre. Todas la formas de utilización de las fuentes de energía, tanto las habituales como las denominadas alternativas o no convencionales, agreden en mayor o menor medida el ambiente, siendo de todos modos la energía eléctrica una de las que causan menor impacto.

La generación de energía eléctrica se lleva a cabo mediante técnicas muy diferentes. Las que suministran las mayores cantidades y potencias de electricidad aprovechan un movimiento rotatorio para generar corriente continua en un dinamo o corriente alterna en un alternador. El movimiento rotatorio resulta a su vez de una fuente de energía mecánica directa, como puede ser la corriente de un salto de agua, la producida por el viento, o a través de un ciclo termodinámico. En este último caso se calienta un fluido, al que se hace recorrer un circuito en el que mueve un motor o una turbina. El calor de este proceso se obtiene mediante la quema de combustibles fósiles, reacciones nucleares y otros procesos.

Pues si la generación es un elemento clave el almacenamiento de energía está cambiando el paradigma de cómo generamos, distribuimos y utilizamos la energía. Con el crecimiento exponencial previsto para los próximos años, las soluciones de almacenamiento de energía entregarán la energía de forma más inteligente, los servicios energéticos serán más dinámicos, permitirán abordar el problema de los picos de la demanda y un uso mayor de la generación de origen renovable, principalmente de las tecnologías eólica y solar. Con todo esto conseguiremos disponer de un sistema eléctrico más robusto y flexible al mismo tiempo, que beneficiará a generadores y consumidores.
Razón por la cual en la actualidad, cada vez más las empresas eléctricas convencionales han asumido proyectos de almacenamiento junto con un surtido de activos tradicionales y no tradicionales como elemento básico para satisfacer las necesidades de fiabilidad, capacidad y actualización del sistema presentes y futuras.



2

ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA



El principal problema de un sistema energético es adaptar su producción y el consumo de energía. El suministro de energía eléctrica tiene una demanda fluctuante a lo largo del día, lo que conlleva a sistemas de producción no adaptables. Es en este caso donde se pone de manifiesto la importancia del almacenamiento de la energía producida.

Una solución para el suministro eléctrico es producir a un valor medio entre el máximo y el mínimo, almacenar energía cuando la demanda es menor y recuperarla cuando es mayor.

El *almacenamiento de energía* comprende los métodos que tiene la humanidad para conservar en la medida de lo posible una cierta cantidad de energía en cualquier forma, para liberarla cuando se requiera en la misma forma en que se recolectó o en otra diferente. Las formas de energía pueden ser energía potencial (gravitacional, química, elástica, etc.) o energía cinética.

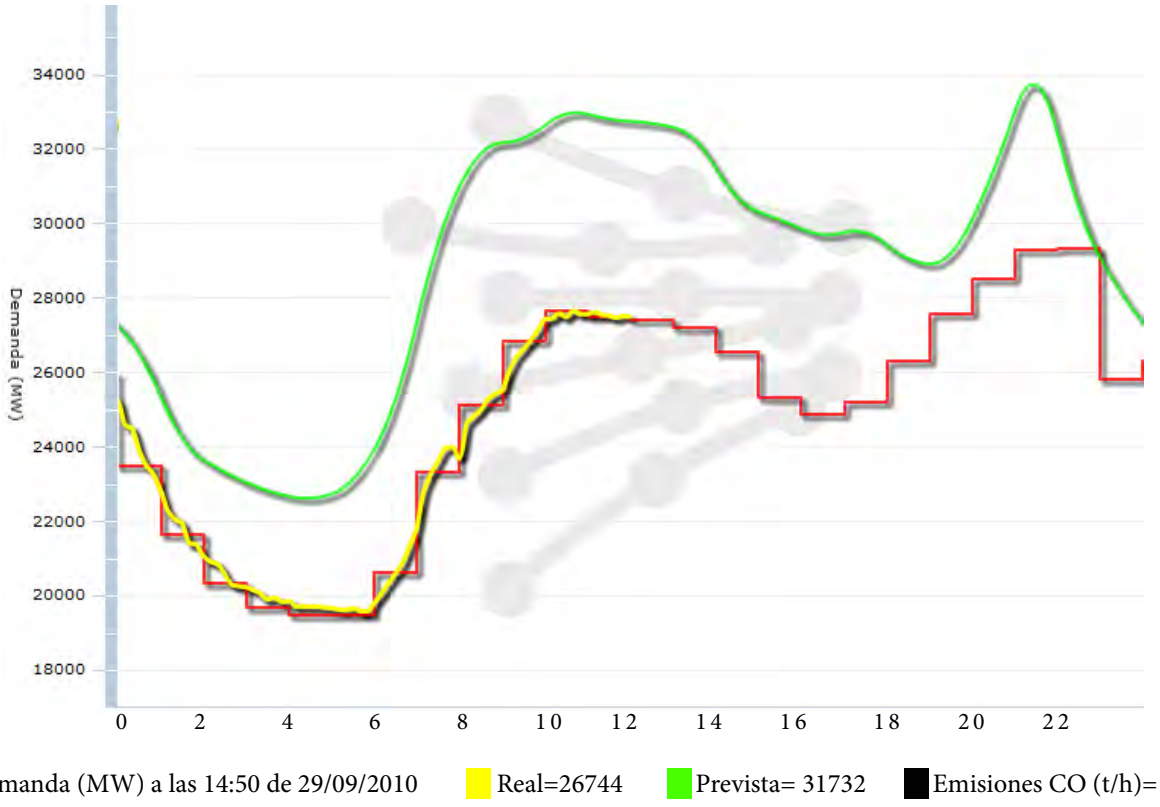


Figura 1: gráfica almacenamiento de energía.

La ventaja que tiene el almacenamiento es la respuesta rápida frente a la demanda (con respecto a la puesta en marcha de un equipo generador). Teniendo en cuenta el aumento del precio de los combustibles, el aumento de la demanda de energía y que cada vez hay una mayor concienciación social con el tema del ahorro y la contaminación, hay que poner en marcha sistemas de creación de energía que no derrochen ésta en su generación. Todo esto impulsa la creación de secciones en las centrales dedicadas al almacenamiento de energía, para que cuando la demanda sea baja, la energía que se siga produciendo no se derroche y pueda llegar a ser utilizada en otro momento.

3

ELECCIÓN DEL MÉTODO ADECUADO



Los métodos de almacenamiento aplican una transformación a la energía sobrante donde se tiene en cuenta la importancia del rendimiento de las transformaciones

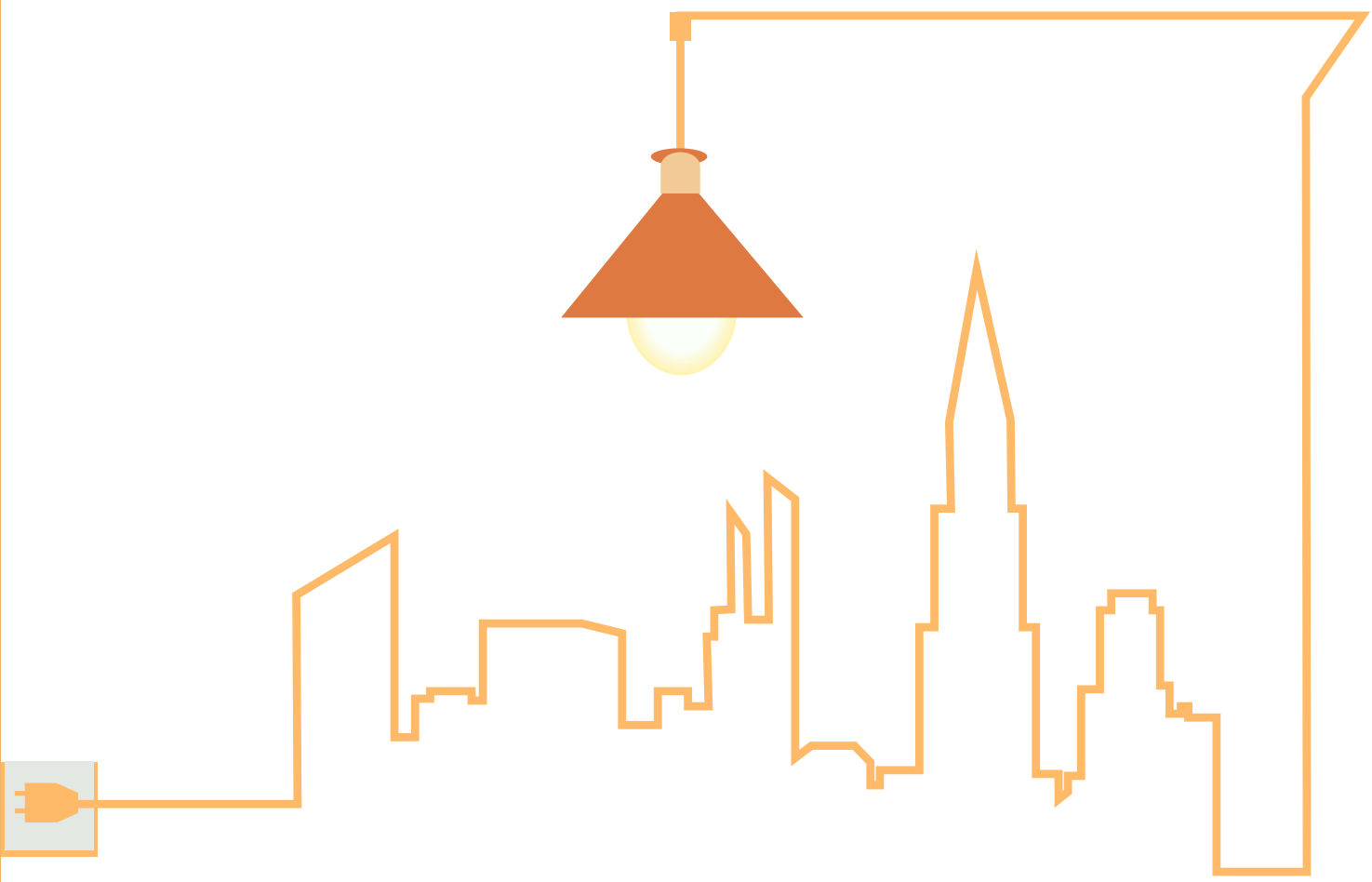
Se deben tener en cuenta algunas consideraciones:

• Consideraciones energéticas (rendimiento de almacenamiento, capacidad de almacenamiento del sistema y rendimiento de la recuperación).

• Consideraciones energéticas (vida útil del sistema: número de ciclos almacenamiento/recuperación y función de uso del sistema: salida de sistema almacenamiento/salida sistema de producción).

• Consideraciones económicas (precio por kW de los dispositivos transformadores y precio por kW del dispositivo de almacenamiento).

• Elección: compromiso entre la solución que presente mayores ventajas desde el ámbito energético y económico.



4

SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA



El almacenamiento de energía se logra por medio de dispositivos o soportes físicos que almacenan cierta forma de energía para llevar a cabo alguna operación útil en un momento posterior. A los dispositivos que almacenan energía a veces reciben el nombre de acumuladores de energía.

Hasta ahora el método más empleado para el almacenamiento eléctrico son las plantas eléctricas. Existen también varios tipos de almacenamiento, entre los cuales podemos encontrar: almacenamiento mecánico, químico o electroquímico, eléctrico y magnético, y también almacenamiento térmico.

A continuación detallamos un esquema general de las categorías en las que dividiremos los sistemas de almacenamiento de energía.

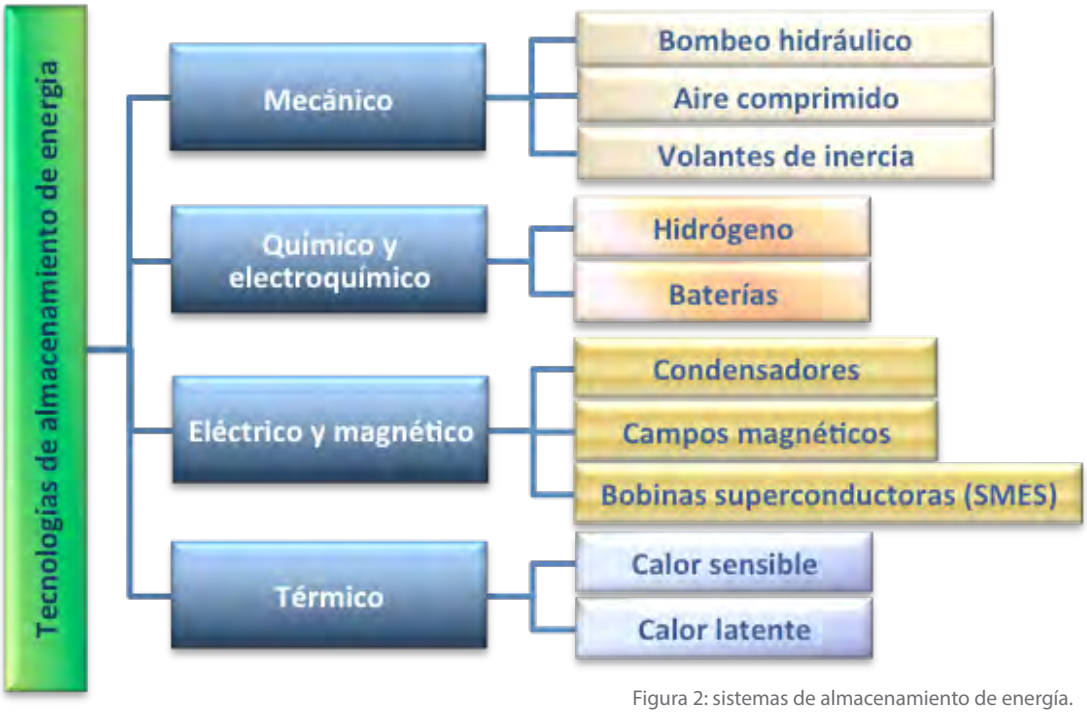


Figura 2: sistemas de almacenamiento de energía.

4.1. Almacenamiento mecánico

El almacenamiento mecánico funciona de una manera muy sencilla. La energía recibida en el sistema de almacenamiento es recogida en forma de energía cinética o de energía potencial. La energía recogida del sistema generador de energía que sobra, es almacenada en depósitos llamados acumuladores. La energía puede estar almacenada en acumuladores hidráulicos, acumuladores de aire comprimido o acumuladores inerciales.

4.1.1. Bombeo hidráulico

El bombeo hidráulico es el método más desarrollado y empleado en el almacenamiento de energía y se basa en un principio sencillo: *"La presión ejercida sobre la superficie de un fluido se transmite con igual intensidad en todas las direcciones"*. Su almacenamiento se realiza en forma de energía potencial gravitatoria de una masa de agua.

En cuanto a su función, podemos considerar dos posibilidades extremas de bombas: las que dan un gran caudal a pequeña presión y las que dan un pequeño caudal a alta presión.

La misión del primer tipo es la de llenar rápidamente las conducciones y cavidades del circuito (como ocurre al hacer salir un cilindro que trabaje en vacío). Las del segundo tipo servirán para hacer subir y mantener la presión en el circuito. Claro que en la mayoría de los casos no se van a usar dos bombas y hay que buscar un compromiso entre estos extremos.

Otras consideraciones llevan a la necesidad de construir bombas que tengan características determinadas. Así, para obtener una velocidad constante en un cilindro, nos hará falta una bomba de caudal constante. Si queremos después mantener el cilindro en posición, no necesitaremos todo el caudal, por lo que nos puede interesar una bomba capaz de trabajar a dos caudales constantes: uno alto y otro bajo. Otro tipo de problemas exigirá bombas de caudal regulable en uno o en dos sentidos, bombas de potencia constante, etc.

Las centrales de bombeo españolas funcionan en su mayoría con bomba-turbina reversible, que tienen un rendimiento global de un 65% y pueden almacenar entre 200 y 2.000 MWh. Las pérdidas pueden ser por rendimientos de bomba y turbina, pérdidas de carga en conducciones, filtraciones, fugas y evaporación.

Las principales centrales de bombeo españolas son las siguientes:

Central	Río	Provincia	Potencia (MW)
Villarino	Tormes	Salamanca	810
La Muela	Júcar	Valencia	628
Estany-Gento	Flamisell	SalienteLérida	451
Aldeadávila II	Duero	Salamanca	421
Tajo de la Encantada	Guadalhorce	Málaga	360
Aguayo	Torina	Cantabria	339
Canso	Camba-Conso	Orense	228
Valdecañas	Tajo	Cáceres	225
TOTAL			5.120

Tabla 1: centrales de bombeo españolas.

4.1.1.1. Bomba hidráulica

Una bomba hidráulica es un dispositivo tal, que recibiendo energía mecánica de una fuente exterior, la transforma en una energía de presión transmisible de un lugar a otro de un sistema hidráulico a través de un líquido cuyas moléculas estén sometidas precisamente a esa presión.

Los sistemas de bombeo hidráulico proporcionan una flexibilidad extraordinaria en la instalación y capacidad de funcionamiento para cumplir una amplia gama de requerimientos de extracción artificial. La instalación de la potencia superficial puede ponerse en un lugar central para servir a pozos múltiples, o como una unidad conveniente montada sobre patín localizada en el lugar del pozo individual.

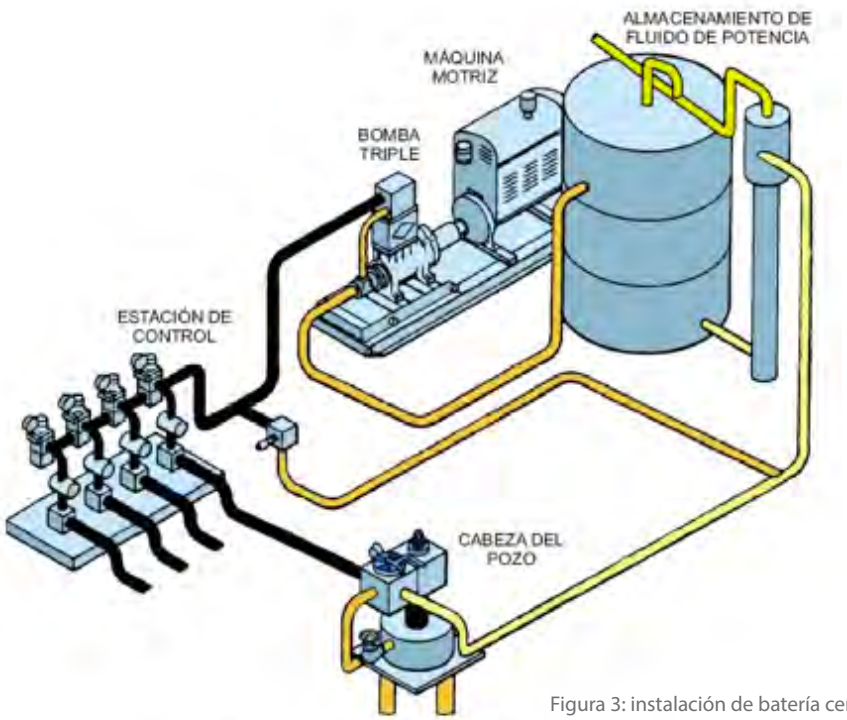


Figura 3: instalación de batería central.

- **Capacidades de Funcionamiento**

Las capacidades de funcionamiento significativas de este sistema de hidráulico de extracción incluyen:

- Caudales de producción desde 100 hasta 15.000 BPD -ajustables en la superficie, del 20 a 100% de capacidad
- Profundidades de operación mayores de 15.000 pies
- Selección de bombas de chorro de pistón de desplazamiento positivo para que funcionen en tubos de 2" a 4 pulgadas
- Las bombas de desplazamiento positivo pueden lograr máximo volumen de desagüe remanente
- Las bombas de chorro manejan altas relaciones de gas/petróleo, y fluidos del pozo que son arenosos, corrosivos o de alta temperatura
- Uso del agua o crudo producido como fluido de potencia
- Sistemas de fluido de potencia cerrados para que las instalaciones de la bomba de pistón aíslen el fluido de potencia de la producción
- Las bombas de chorro y de pistón pueden encajar intercambiadas en el mismo conjunto del fondo del pozo de "bomba libre

- **Funcionamiento**

En el sistema de bombeo hidráulico, el fluido se toma del tanque de almacenamiento y se alimenta a la bomba Triple/Múltiple. El fluido de potencia, ahora con la presión aumentada por la bomba triple, está controlada por las válvulas en la estación de control y distribuida en uno o más pozos. El fluido de potencia pasa a través de las válvulas del cabezal del pozo y es dirigido a la bomba de cota inferior. En una instalación de bomba de pistón, este fluido de potencia acciona el motor que a su vez acciona la bomba. El fluido de potencia regresa a la superficie con el crudo producido y es enviado por tubería al tanque de almacenamiento.

Los sistemas de bombeo hidráulico se dividen en dos clases de acuerdo al tipo de bomba de subsuelo:

bombas hidráulicas de pistón y las bombas hidráulicas tipo jet. Aunque la bomba hidráulica de pistón es un dispositivo de alta eficiencia volumétrica, sus debilidades operacionales en términos de calidad del fluido motriz, no la hace una solución versátil y por el contrario es muy limitada su aplicación.

a. Bombeo hidráulico tipo jet (chorro)

El bombeo hidráulico tipo Jet, es un mecanismo de producción de pozos petroleros, que actúa mediante la transferencia de potencia a una bomba de subsuelo con un fluido presurizado que es bombeado a través de la tubería de producción. La bomba de subsuelo actúa como un transformador convirtiendo la energía del fluido motriz en energía potencial o presión sobre los fluidos producidos.

La bomba de subsuelo tipo Jet, logra su acción de bombeo mediante la transferencia de energía entre dos corrientes de fluidos. La alta presión del fluido motriz enviado desde la superficie pasa a través de una boquilla donde su energía potencial o presión es convertida en energía cinética en la forma de chorro de fluido a gran velocidad. El fluido a producir es succionado y mezclado con el fluido motriz en la garganta de la bomba y llevado a superficie.

No requiere de varillas o cables eléctricos para la transmisión de potencia a la bomba de subsuelo. Es un sistema con dos bombas una en superficie que proporciona el fluido motriz y otra en el fondo que trabaja para producir los fluidos de los pozos. La bomba de subsuelo puede ser instalada y recuperada hidráulicamente o con unidades de cable. Los fluidos producidos pueden ser utilizados como fluido motriz. Su mantenimiento es de bajo costo y de fácil implementación.

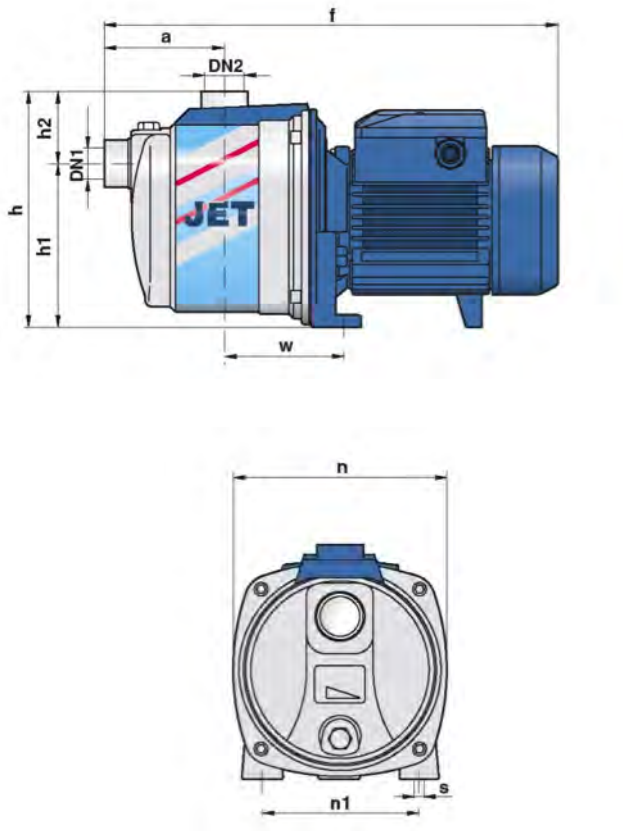


Figura 4: bombeo hidráulilco tipo jet.

b. Bombeo hidráulico tipo pistón

En el caso de Bombeo Hidráulico Tipo Pistón, el equipo de subsuelo está formado básicamente por: un arreglo de tubería, el cual permite clasificar los diferentes tipos de instalaciones del sistema, tales como: tipo insertable fijo, entubado fijo, bomba libre tipo paralelo y tipo entubado; y por una bomba hidráulica de succión: el principio de operación es similar al de las bombas del Bombeo Mecánico, sólo que en una instalación de Bombeo Hidráulico Tipo Pistón, la cabilla se encuentra en el interior de la bomba. Las bombas hidráulicas se clasifican en bombas de acción sencilla y las de doble acción. Las de acción sencilla desplazan fluido a la superficie en un solo sentido, es decir, en el movimiento de ascenso o descenso. Las de doble acción desplazan fluido hasta la superficie en ambos recorridos, ya que poseen válvulas de succión y de descarga en ambos lados del pistón que combinan acciones de apertura y cierre de las válvulas de succión y descarga del mismo.



Figura 5: bombeo hidráulico tipo pistón.

Las bombas de pistones están formadas por un conjunto de pequeños pistones que van subiendo y bajando de forma alternativa de un modo parecido a los pistones de un motor a partir de un movimiento rotativo del eje. Estas bombas disponen de varios conjuntos pistón-cilindro de forma que mientras unos pistones están aspirando líquido, otros lo están impulsando, consiguiendo así un flujo menos pulsante; siendo más continuo cuantos más pistones haya en la bomba; el líquido pasa al interior del cilindro en su carrera de expansión y posteriormente es expulsado en su carrera de compresión, produciendo así el caudal.

La eficiencia de las bombas de pistones es, en general, mayor que cualquier otro tipo, venciendo, generalmente, presiones de trabajo más elevadas que las bombas de engranajes o de paletas.

Las tolerancias muy ajustadas de estas bombas las hacen muy sensibles a la contaminación del líquido. Según la disposición de los pistones con relación al eje que los acciona, estas bombas pueden clasificarse en tres tipos:

- Axiales: los pistones son paralelos entre si y también paralelos al eje.
- Radiales: los pistones son perpendiculares al eje, en forma de radios.
- Transversales: los pistones, perpendiculares al eje, son accionados por bielas.

c. Ventajas y desventajas del bombeo hidráulico

- Ventajas del bombeo hidráulico
  - Pueden ser usados en pozos profundos (+/- 18000 pies).
  - No requieren taladro para remover el equipo de subsuelo.
  - Puede ser utilizado en pozos desviados, direccionales y sitios inaccesibles.
  - Varios pozos pueden ser controlados y operados desde una instalación central de control.
  - Puede manejar bajas concentraciones de arena.

- Desventajas del bombeo hidráulico
  - Costo inicial alto
  - Las instalaciones de superficie presentan mayor riesgo, por la presencia de altas presiones.
  - Altos costos en la reparación del equipo.
  - Problemas de corrosión.
  - El diseño es complejo.

4.1.1.2. Acumulador hidráulico

Un acumulador es una especie de depósito capaz de almacenar una cierta cantidad de fluido con presión, para auxiliar al circuito hidráulico en caso de necesidad. Los acumuladores son dispositivos hidráulicos que pueden realizar la misma función que una bomba; es decir, actúan como "generadores de energía", los cuales van asociados a una bomba volumétrica.

Los supuestos casos de necesidad pueden ser:

1. Restituir. Compensar pequeñas pérdidas de fluido en el circuito.
2. Contra dilatación. Los fluidos por cambios de temperaturas pueden dilatarse y perder presión.
3. Reserva. Al poder mantener una presión, pueden servir de reserva de energía.
4. Contra golpes de ariete. El golpe de ariete es un concepto hidráulico que engloba diferentes causas de pérdida de caudal, como podrían ser el cierre de válvulas, parada de bombas, puesta en marcha de bombas, etc.
5. Amortiguador. Puede utilizarse para amortiguar las pulsaciones de una bomba.
6. Seguridad. Para evitar accidentes por interrupciones súbitas del generador de potencia.

a. Simbología

El fluido al entrar dentro de un acumulador levanta un peso, comprime un muelle o comprime un gas, por éstos posibles motivos, el acumulador puede almacenar el fluido bajo una presión y también, esta es la causa que existan varios tipos de acumuladores. Los más usados son los de membrana y los de vejiga.

La simbología existente sobre todos los tipos de acumuladores hidráulicos es la siguiente:

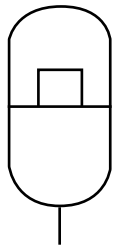
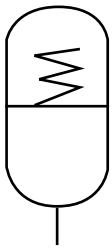
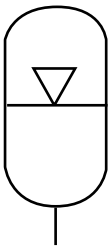
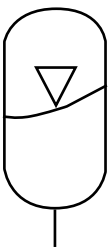
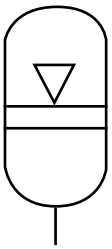
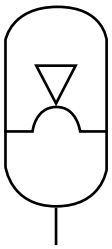
Acumulador tipo peso	Acumulador tipo muelle	Acumulador general de gas	Acumulador tipo vejiga	Acumulador tipo cilindro neumático	Acumulador tipo membrana
					

Figura 6: acumuladores hidráulicos.

Los acumuladores hidráulicos más utilizados son los acumuladores de pistón y de vejiga.

- **Acumuladores de pistón:** son de construcción similar a un cilindro hidráulico, en los que para separar el gas del fluido hidráulico se utiliza un pistón libre que una vez entra el aceite a presión comprime el gas y, posteriormente, bajo la presión de éste tiende a enviar externamente el aceite contenido en la cámara opuesta. La presión depende de la compresión y varía con el volumen de aceite que hay en la cámara.

- **Acumuladores de membrana o de vejiga:** en ellos, la separación líquidos/gas se realiza mediante una membrana o vejiga, generalmente de caucho sintético. El aceite oscila entre el 25% y el 75% de la capacidad

total, ya que trabajando fuera de estos límites el elemento separador puede sufrir desperfectos, limitándose su durabilidad.

Por regla general los acumuladores de membrana son mucho mejores que los de pistón, ya que éstos prácticamente carecen de mantenimiento.

b. Proveedores

- http://www.hydac.com/
- http://www.spx.com/
- http://www.eaton.com/Eaton/index.htm
- http://www.kosmek.co.jp/eng/index.html
- http://www.parker.com/portal/site/PARKER/menuitem.b90576e27a4d71ae1bfcc510237ad1ca/?vgnextoid=c38888b5bd16e010VgnVCM1000000308a8c0RCRD&vgnextfmt=default
- http://www.enerpac.com/
- http://www.elbi.it/
- http://www.ponar-silesia.pl/
- http://www.hydroleduc.com/
- http://www.industrystock.es/html/Acumuladores%20hidr%C3%A1ulicos/product-result-es-19962-0.html



Figura 7: modelos de acumuladores.

4.1.1.3. Conclusiones

1. Cuando se van a instalar varios pozos a un sistema de producción artificial, el costo inicial (inversión) por pozo generalmente es menor para el bombeo hidráulico que en el bombeo mecánico.

2. Para un mismo diámetro de tubería el bombeo hidráulico permite sacar mayor volumen y a profundidades muy superiores comparadas con el bombeo mecánico.

3. En el bombeo hidráulico se hace fácil centralizar y automatizar los controles de todos los pozos.

4. Este sistema es ideal en pozos desviados, practico en pozos verticales y en localizaciones inaccesibles para ratas y profundidades que lo justifiquen.

5. El equipo se puede utilizar con ventajas en pozos profundos y aún en pozos superficiales con grandes ratas.

6. Las indicaciones de presión de operación nos sirven para determinar el nivel del fluido y evaluar las condiciones de trabajo del equipo de subsuelo.

7. Los productos químicos para prevenir taponamientos por parafina y evitar corrosión pueden ser agregados fácilmente al aceite motriz, permitiendo un tratamiento más efectivo.

8. Teóricamente el bombeo hidráulico aparece como la solución a todo tipo de producción artificial de pozos petroleros. Sin embargo, factores prácticos, como contaminantes en el aceite, arena, agua y sólidos en suspensión, deposición de parafinas en las tuberías y en general el excesivo costo de tratamiento particularmente cuando la producción posee alto corte de agua hacen que su atractivo sea menor.

9. Probablemente el factor más importante que gobierna el éxito y la economía de las operacio nes en bombeo hidráulico es una buena calidad del fluido motriz. Antes de arrancar un sistema hidráulico es conveniente circular suficiente fluido a través de todo el circuito con el fin de asegurar la limpieza de todo el equipo y evitar daños causados por escoria de soldadura o partículas u objetos extraños dentro de la tubería.

4.1.1.4. Proyectos relacionados

- **Bombeo hidráulico mediante accionamiento eólico**

La nueva invención de Manuel Torres Martínez en el campo de las energías renovables, se trata de un aerogenerador eólico-hidráulico de caudal variable por revolución y presión constante.
La invención está relacionada con los sistemas de bombeo hidráulico mediante accionamiento eólico, proponiendo un sistema aerogenerador eólico-hidráulico de caudal variable por revolución y presión constante, ambas independientes de la velocidad del rotor eólico, con control coordinado para optimización del rendimiento, del rechazo de huecos de tensión y de la regulación de la potencia reactiva.
http://www.economiadelaenergia.com/2011/06/bombeo-hidraulico-mediante-accionamiento-eolico/

- **Central hidroeléctrica Chira-Soria**

Este proyecto se iniciará con la construcción de la desaladora, con el objetivo de bombear agua hasta los embalses desde un año antes de la puesta en marcha de la central hidroeléctrica. La desaladora estará en la desembocadura del barranco de Arguineguín, en las proximidades de la cementera, y tendrá una capacidad de 5.200 metros cúbicos al día.
Cuando empiece a funcionar la central hidroeléctrica ya llevará casi un año bombeando agua, independientemente de la que pueda llegar por la lluvia. Una vez que se aporte a las presas el agua necesaria, la desaladora se utilizará para reponer las pérdidas de la evaporación. El resto se aprovechará para la agricultura, con precios pactados.
http://www.laprovincia.es/gran-canaria/2011/05/22/proyecto-chira-soria-arranca-llenado-presas-agua-desalada/374354.html

- **Aquabank, almacenamiento de energía hidráulica en el subsuelo**

Riverbank Power, una empresa canadiense con experiencia en el campo de la energía eólica, ofrece un planteamiento totalmente novedoso para almacenar la energía potencial del agua. En lugar de usar colinas o lugares elevados para hacer subir el agua, la guarda en el subsuelo e invierte el proceso.
Aquabank es una nueva manera de acumular energía, similar a las baterías, que permitirá la proliferación de otras fuentes de energía renovables como la eólica, mareomotriz o biomasa.
http://www.ison21.es/2009/09/02/aquabank-almacenamiento-de-energia-hidraulica-en-el-subsuelo/

4.1.2. Aire Comprimido

El aire comprimido se refiere a una tecnología o aplicación técnica que hace uso de aire que ha sido sometido a presión por medio de un compresor. En la mayoría de aplicaciones, el aire no sólo se comprime sino que también se deshumifica y se filtra. El uso del aire comprimido es muy común en la industria, su uso tiene la ventaja sobre los sistemas hidráulicos de ser más rápido, aunque es menos preciso en el posicionamiento de los mecanismos y no permite fuerzas grandes.

Existen tres métodos de almacenamiento, uno adiabático, uno diabático y otro híbrido.

- El método adiabático consiste en almacenar en el aire (o en sistema auxiliar) la energía asociada al calentamiento durante la compresión y se restituye antes de la expansión. Su principal ventaja es que con la misma relación de presión, el trabajo de la turbina es proporcional a la temperatura de entrada.
El almacenamiento adiabático retiene el calor producido por la compresión y la devuelve a la atmósfera cuando el aire se expande para generar energía. Este es un tema de estudio en curso. Su eficacia teórica se acerca al 100% para dispositivos de gran tamaño o como aislamiento térmico perfecto, pero en la práctica la eficiencia de ida y vuelta se espera que sea del 70%. El calor puede ser almacenado en un sólido como el hormigón o piedra, o más probablemente en un fluido como el aceite caliente (hasta 300 ° C) o soluciones de sales fundidas (600 ° C)

- El almacenamiento diabático disipa el calor extra con intercoolers (acercándose así a la compresión isotérmica) en la atmósfera en forma de residuos. Al final del almacenamiento, el aire debe ser recalentado antes de la expansión en la turbina para mover un generador, que se puede lograr con un quemador de gas natural para el almacenamiento de servicios públicos de grado o con una masa de metal calentado. La pérdida de calor degrada la eficiencia, pero este método es más simple y es hasta ahora el único sistema que ha sido implementado comercialmente. La McIntosh, planta CAES en Alabama requiere 2,5 MJ de energía eléctrica y 1,2 MJ menor poder calorífico (PCI) de gas por cada MJ de la producción de energía. General Electric 7FA 2x1 central de ciclo combinado, es una de las plantas de gas natural con mayor nivel

de eficiencia en operación, utiliza 6,6 MJ (PCI) de gas por kW-h generado, una eficiencia de 54% térmica comparable a la McIntosh 6,8 MJ, con una eficiencia térmica del 53%

- En cambio, el método híbrido consiste en que el calor de la compresión se disipa y se añade calor por combustión antes de la expansión. Las ventajas son que los gastos de operación y mantenimiento son menores.

Actualmente sólo hay dos centros CAES en funcionamiento a nivel mundial. La primera es una unidad de 270 MW que se construyó en Huntdorf, Alemania en 1978 y la otra, una unidad de 110 MW, se construyó en McIntosh, Alabama, en 1991. CAES clásica facilidades de compra barata fuera de pico de potencia y lo utilizan para comprimir adiabáticamente aire en sal subterránea o cavernas de piedra caliza. Durante horas punta, el aire comprimido se extrae de la caverna para reemplazar a la fase de compresión en las turbinas de combustión de gas natural como combustible. El resultado es una reducción de los costes de funcionamiento de la turbina de gas, como la fase de compresión normalmente consume aproximadamente la mitad de la electricidad generada.



Figura 8: instalaciones CAES .

4.1.2.1. Producción del aire comprimido

- **Generadores**

Para producir aire comprimido se utilizan compresores que elevan la presión del aire al valor de trabajo deseado. Los mecanismos y mandos neumáticos se alimentan desde una estación central. Entonces no es necesario calcular ni proyectar la transformación de la energía para cada uno de los consumidores. El aire comprimido viene de la estación compresora y llega a las instalaciones a través de tuberías.

En el momento de la planificación es necesario prever un tamaño superior de la red, con el fin de poder alimentar aparatos neumáticos nuevos que se adquieran en el futuro. Por ello, es necesario sobredimensionar la instalación, al objeto de que el compresor no resulte más tarde insuficiente, puesto que toda ampliación posterior en el equipo generador supone gastos muy considerables.

Es muy importante que el aire sea puro. Si es puro el generador de aire comprimido tendrá una larga duración. También debería tenerse en cuenta la aplicación correcta de los diversos tipos de compresores.

- **Tipos de compresores**

Según las exigencias referentes a la presión de trabajo y al caudal de suministro, se pueden emplear diversos tipos de compresor.

Se distinguen varios tipos de compresores:

- Destacamos los que operan según el principio de desplazamiento. La compresión se obtiene por la admisión del aire en un recinto hermético, donde se reduce luego el volumen. Se utiliza en el compresor de émbolo (oscilante o rotativo).

- Por otro lado es necesario reseñar aquellos cuya operatividad se basa en el principio de la dinámica de los fluidos. El aire es aspirado por un lado y comprimido como consecuencia de la aceleración de la masa (turbina).

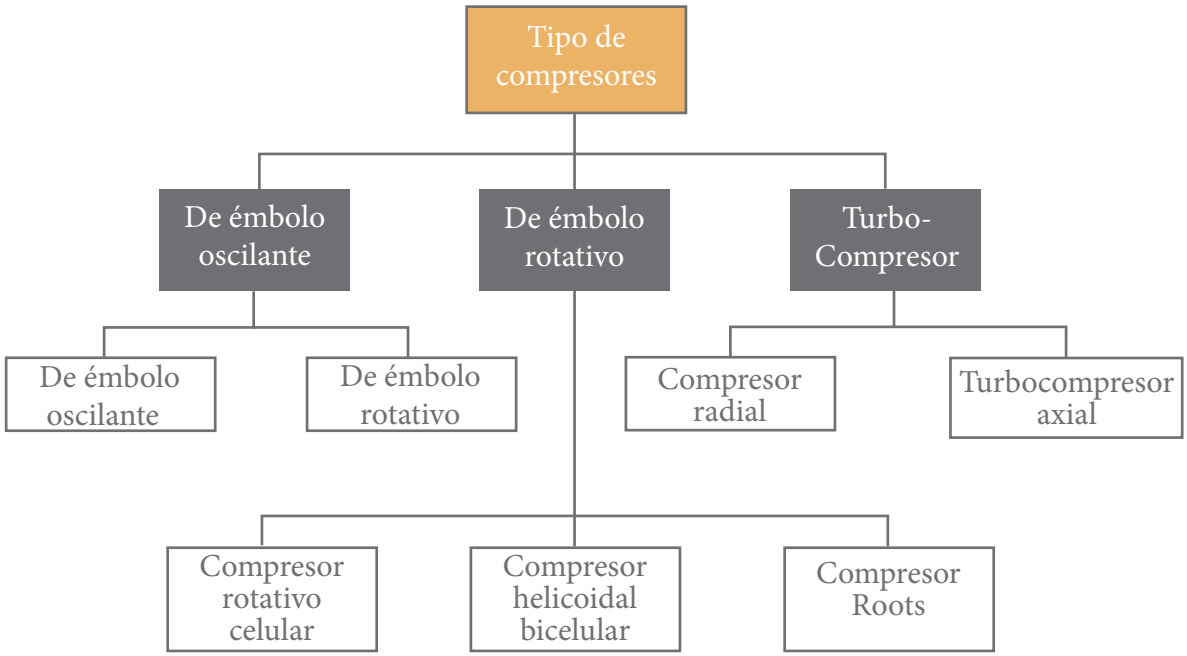


Figura 9: esquema tipo de compresores.

4.1.2.2. Acumulador de aire comprimido

El acumulador o depósito sirve para estabilizar el suministro de aire comprimido. Compensa las oscilaciones de presión en la red de tuberías a medida que se consume aire comprimido. Gracias a la gran superficie del acumulador, el aire se refrigera adicionalmente. Por este motivo, en el acumulador se desprende directamente una parte de la humedad del aire en forma de agua.

El tamaño de un acumulador de aire comprimido depende:

- Del caudal de suministro del compresor
- Del consumo de aire
- De la red de tuberías (volumen suplementario)
- Del tipo de regulación
- De la diferencia de presión admisible en el interior de la red

- **Riesgos.**

El principal riesgo que presentan estos aparatos, al estar sometidos a presión interna, es el de explosión, que puede venir determinada por alguna de las siguientes causas:

- Defectos de diseño del aparato.
- Defectos en la fase de construcción y montaje, en las cuales se tendrán muy en cuenta el proceso de soldadura de virolas, fondos, refuerzos, tubuladuras, etc., y los efectos que el calor aportado por ella puede tener sobre las características de los materiales.
- Sobrepresión en el aparato por fallo de los sistemas de seguridad.
- Sobrepresión por presencia de fuego exterior.
- Sobrepresión y riesgo de explosión por autoignición de depósitos carbonosos procedentes del aceite de lubricación. del compresor.
- Disminución de espesores de sus materiales, por debajo de los límites aceptables por diseño, debido a la corrosión.
- Corrosiones exteriores, localizadas en el fondo o en la generatriz inferior, según se trate de un depósito vertical u horizontal.
- Erosiones o golpes externos.
- Fisuras debidas a las vibraciones transmitidas por compresores instalados sobre los propios acumuladores o por una fundación del compresor inadecuada.
- Esfuerzos locales en la zona de conexión de la tubería de aire comprimido proveniente del compresor, debido a mal alineamiento, dilataciones y presión interna de la tubería.
- Fatiga de materiales debido a trabajo cíclico.

- **Elementos de Seguridad.**

Estos aparatos cuyo diseño y construcción deberán seguir todos los pasos establecidos en el Código de diseño elegido referentes a materiales, espesores de los mismos, procesos de soldadura, tratamientos térmicos, ensayos no destructivos, etc., deberán contar con un certificado de calidad que asegure que los anteriores pasos han sido seguidos cuando se trate de un aparato de construcción única, y del correspondiente registro de tipo si se trata de un aparato construido en serie. Independientemente de ello, deberán contar con los siguientes elementos de seguridad, cuyas prescripciones son obligatorias en la mayor parte de los casos a tenor de la legislación vigente.

- Válvula de seguridad cuya capacidad y presión de descarga será adecuada al caudal máximo de aire comprimido capaz de suministrar el compresor en las condiciones más desfavorables.
- Indicador de presión interna del aparato.
- Tapón fusible, en previsión del riesgo de explosión por autoignición de depósitos carbonosos por elevación de la temperatura.
- Sistema de drenaje manual o automático; en el caso de drenaje manual, las válvulas serán de paso recto y total, con objeto de minimizar los residuos que puedan quedar retenidos y llegar a inutilizar la válvula de drenaje.
- En el caso de drenaje automático, tendrán la capacidad de descarga adecuada a la cantidad de líquido a eliminar, estando diseñadas para minimizar los residuos retenidos así como contar con un dispositivo manual para su comprobación.
- La disposición de un filtro inmediatamente antes de la válvula ayuda eficazmente a eliminar la presencia de residuos en las mismas.
- Contaran con las aperturas adecuadas para su inspección y mantenimiento.
- Todos los elementos de seguridad serán fácilmente accesibles.
- Contaran con las siguientes placas de identificación, situadas de forma bien visible:

- Placa de Diseño: en la que figurará la presión de diseño y en su caso la máxima de servicio, el número de registro del aparato y la fecha de primera prueba y revisión.
- Placa de identificación: en la que constara entre otros datos, el nombre y razón social del fabricante, contraseña y fecha de registro, si procede, número de fabricación, características principales.

a. Proveedores

- **Good-Air, S.L.**
  08907 Hospitalet de Llobregat España
  http://www.goodair.es/

- **AirControl Industrial, S.L.**
  20014 San Sebastián-Donostia España
  http://www.aircontrol.es/

- **C. & A. Leizarán, S.L.**
  20400 Ibarra España
  http://www.leizaran.com/

- **Epidor, S.A.**
  33207 Gijón 28021 Madrid España
  http://www.epidor.com/

b. PNU Power

- **Nueva tecnología para almacenamiento de energía en aire comprimido**

Energetix, un fabricante de productos de eficiencia energética del Reino Unido, modifica tecnologías existentes para crear productos de eficiencia energética a bajo coste. Su nuevo desarrollo es Pnu Power, una solución que proporciona energía ininterrumpible (UPS) y energía de apoyo utilizando aire comprimido.

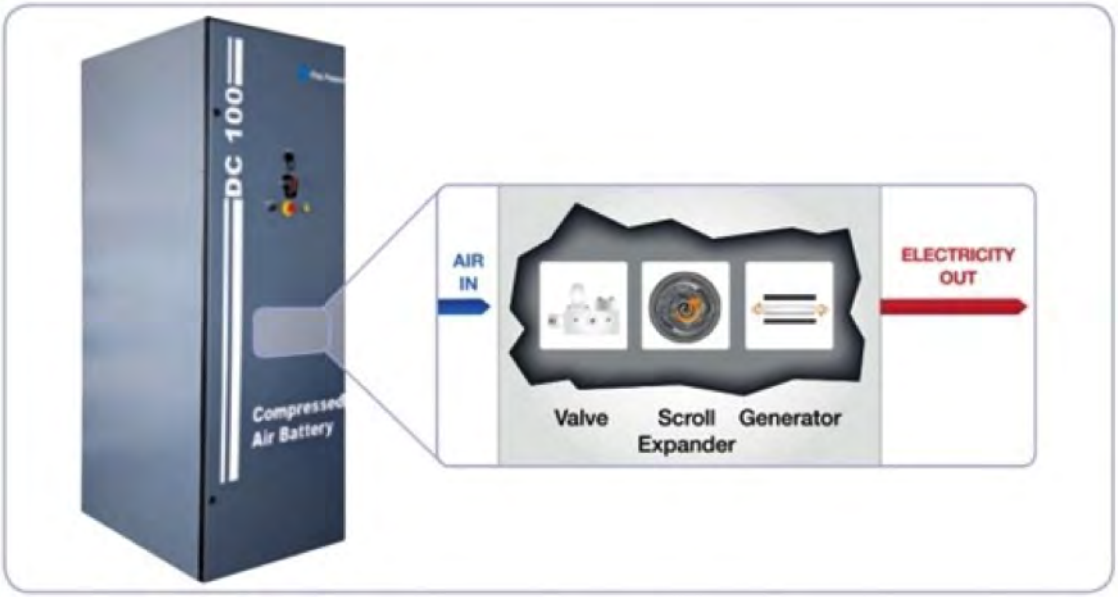


Figura 10: esquema de almacenamiento de energía en aire comprimido.

Sus ingenieros han modificado un compresor scroll estándar, cuya patente procede de 1905, para operar en sentido inverso – como un expansor. Cuando el sistema detecta un corte de energía, opera como una válvula de solenoide de acción rápida para permitir que el aire de los cilindros presurice los reguladores de aire aguas abajo. El aire pasa a un expansor scroll, el corazón del sistema Pnu Power, donde el proceso de expansión hace girar un generador, que proporciona electricidad a un bus DC que puede luego convertir la energía a cualquier requerimiento de voltaje.

Hay millones de compresores scroll en funcionamiento, pero a nadie se le había ocurrido hacerlos funcionar a la inversa. Es por ello que los fabricantes que deseen utilizar esta configuración a partir de ahora tendrán que hacerlo bajo licencia y diseños de Energetix.

La compañía empezó a utilizar el concepto de compresor scroll inverso con una caldera doméstica para generar tanto electricidad como calor a partir de gas natural. A partir de ese proyecto inicial comprendió las posibilidades de utilizar este sistema de almacenamiento como alternativa a las baterías de plomo ácido VRLA.

Energetix ha identificado tres áreas principales para utilizar Pnu Power. Las firmas de telecomunicaciones requieren energía sin baterías de larga duración (1 – 8 horas), a la vez que simultáneamente proporcionan aire acondicionado. Con la nueva solución se ahorra el 90 % del uso de un generador. Pnu Power también proporciona energía de standby para interruptores automáticos y aplicaciones de relés de protección en las industrias de transmisión y distribución. También son aplicables en las firmas industriales que necesitan un sistema fiable y consistente UPS para ambientes agresivos.

- **Operación en ambientes agresivos**

Pnu Power es fiable en temperaturas que van de – 20 ºC a + 40 ºC, independientemente del perfil de carga. Cada grado por encima de 25 ºC hace caer a la mitad la vida útil de una batería, así que a temperaturas ambientales elevadas una batería VRLA dura tan solo unos meses. Pnu Power no queda afectado por estas temperaturas y puede operar sin problemas a 40 º C y con un 95 % de humedad relativa.

La capacidad para operar a altas temperaturas elimina la necesidad de utilizar costosos sistemas de control.

PNU Power 100kW & PNU Power 200kW

La alternativa más inteligente a las baterías convencionales para la UPS y las aplicaciones de energía de reserva

- **Beneficios**

  - Los costos de CAPEX competitivos
  - Costos OPEX mucho más bajos que las baterías tradicionales
  - Requisitos de mantenimiento mínimos
  - Pérdidas de espera muy bajas
  - Muy rápido plug-and-play

- **Características**

  - La tecnología probada que se utiliza en la industria aeroespacial, las redes eléctricas y de telecomunicaciones
  - Completa interfaz gráfica de usuario que muestra el estado de serie



Figura 11: dispositivo de almacenamiento de energía en aire comprimido.

- Diseño modular para soluciones escalables
- Independiente y resistente a la intemperie
- Se puede instalar prácticamente en cualquier lugar

Las UPS convencional / baterías de reserva son caros de mantener y tal vez no cumplen cuando es necesario

PNU energía en baterías de aire comprimido son menos costosos de operar, son de bajo mantenimiento y siempre más fiable

- **Vista del sistema**

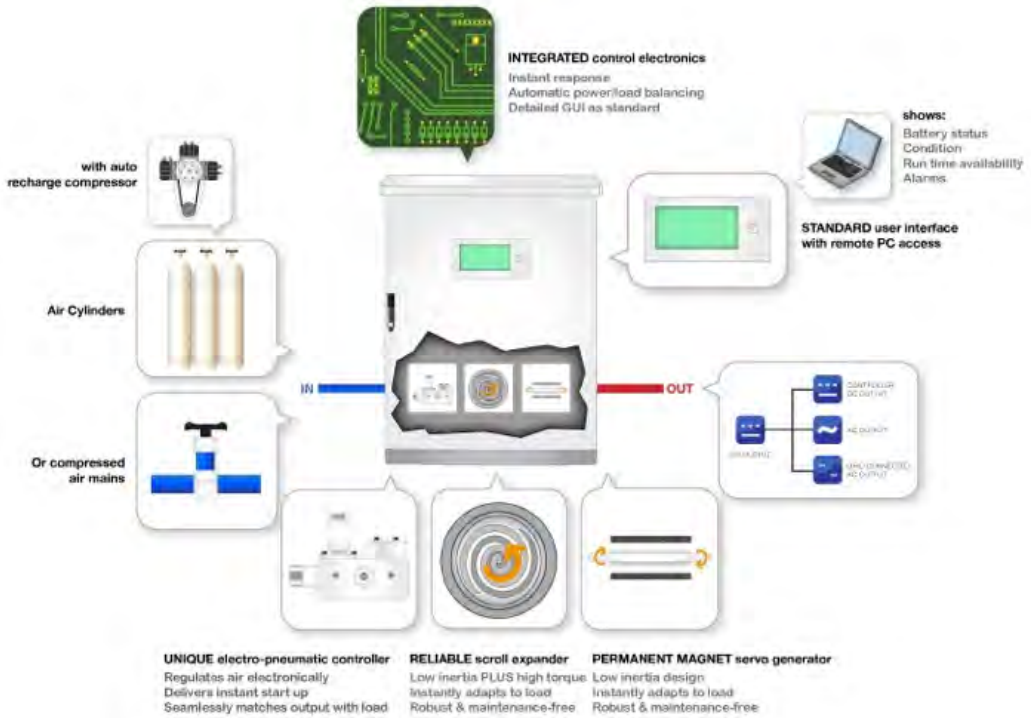


Figura 12: sistema de PNU energía en baterías de aire comprimido.

PNU Power 1MVA

La mayor eficiencia energética sin batería UPS solución para centros de datos y otras aplicaciones de UPS grandes.
A diferencia de las baterías y volantes, PNU Poder sistemas UPS se caracteriza por un uso muy bajo de energía en modo de espera y son extremadamente confiables

- **Beneficios**

- Mínimas pérdidas de espera y mantenimiento
- No hay partes móviles en el modo de espera
- Estado conocido de la carga y disponibilidad
- Costos iniciales y durante su vida útil bajos
- Adecuado para entornos hostiles



Figura 13: PNU Power 1MVA.

- **Características**

  - Módulos contenedores, resistente a la intemperie
  - Tecnología probada y confiable
  - Compresor de recarga automática
  - Una excelente eficiencia energética, incluso el 50% de la carga

- **Vista del sistema**

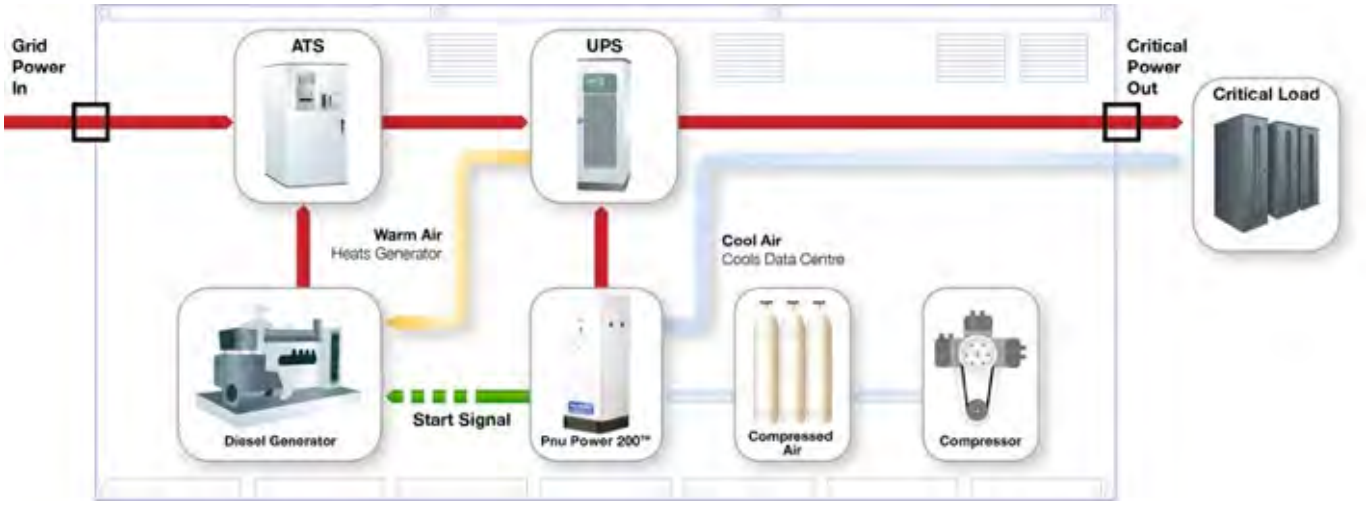


Figura 14: sistema de PNU Power 1 MVA.

c. Costos

Model No.	Descripción	Potencia	Precio
AIR DRUPS 1.0 MVA	**1000 kVA Air DRUPS (900 kW).** *Incluye. 5xDC200, 2x Compresores de recarga, 5x 200 KVA UPS sistemas con cilindros de aire.* No incluye el generador. Todo en contenedores con insonorización y luz.	**1 MVA (900kW)**	**£363,421 = 413.255€ (£390,263 = 443.753€ en contenedores)**
AIR DRUPS 2.0 MVA	**2000 kVA Air DRUPS (1800 kW).** *Incluye. 10xDC200, 4x Compresores de recarga, 10x 200 KVA UPS sistemas con cilindros de aire.* No incluye el generador. Todo en contenedores con insonorización y luz.	**2 MVA (1800 kW)**	**£726,160 = 825.564€ (£771,579 = 877.186€ en contenedores)**

Tabla 2: costos AIR DRUPS.

4.1.2.3. Instalaciones CAES

Los sistemas CAES (compressed air energy storage) utilizan la energía compresiva asociada al aire presurizado contenido en depósitos subterráneos consistente en cavidades naturales o antiguas minas o en acuíferos porosos que están geológicamente contenidos. El almacenamiento se realiza comprimiendo el aire

durante horas valle. Durante horas punta el aire comprimido se utiliza para producir potencia al expandirlo en una turbina de gas con relativamente alta eficiencia.

Las instalaciones de CAES funcionan como grandes baterías. Unos potentes motores eléctricos manejan los compresores que comprimen el aire en una formación geológica subterránea durante los períodos de tiempo en que el uso de la electricidad es menor, como por ejemplo, por las noches. Entonces, cuando se necesita el máximo de electricidad durante los períodos de alta demanda, el aire precomprimido se utiliza en turbinas de combustión modificadas para generar electricidad. Todavía se necesita gas natural u otros combustibles fósiles para hacer funcionar las turbinas, pero el proceso es más eficiente. Este método utiliza hasta un 50 por ciento menos de gas natural que el sistema de producción normal de electricidad.

Aunque el concepto del almacenamiento energético por aire comprimido tiene más de 30 años, sólo existen dos plantas de este tipo: una de 30 años de antigüedad en Alemania, y una de 17 años en McIntosh, Alabama, ambas en cavernas. Una tercera está desarrollándose en un acuífero cerca de Des Moines, Iowa.

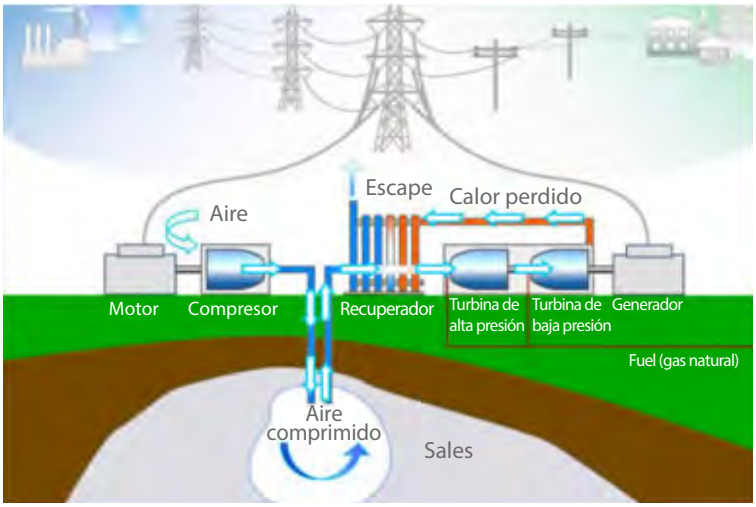


Figura 15: Esquema General Instalación CAES.

La central eléctrica de Iowa tendrá una potencia nominal de unos 268 megavatios, con aproximadamente 50 horas de almacenamiento CAES. Utilizará la abundante generación eólica existente en Iowa para cargarla. Cuando esta nueva central esté en marcha, podrá suministrar el 20 por ciento de la energía eléctrica utilizada en un año en una central eléctrica municipal típica como las que operan en la zona, y podría ahorrar a las ciudades tanto como 5 millones de dólares cada año en la energía comprada.

a. Funcionamiento de una unidad CAES

El proceso tiene su complejidad. En primer lugar, hay que comprimir el aire a una presión muy alta, lo cual, tiene el indeseado efecto de calentarlo a 600ºC; y, para bombearlo al depósito, antes hay que enfriarlo hasta 50 grados. Ambos pasos consumen gran parte de la energía producida inicialmente, pero al término de la operación se recupera la mitad de cada kW gastado. En esta tecnología existen considerables márgenes de mejora: en concreto, 'General Electric' y la compañía alemana RWE planean perfeccionarla y elevar su eficiencia al 70 por ciento.

Una unidad CAES puede producir 100 megavatios durante varias horas, aseguran sus promotores. De ese modo, si el viento ruge a las dos de la madrugada, el operador del parque eólico almacenará la energía generada y la trasmitirá a la red a las diez de la mañana, cuando la demanda sube.

Lo que hace falta son grandes depósitos subterráneos, pero esto no presenta mayores dificultades, puesto que por doquier abundan los yacimientos de gas agotados, las minas abandonadas, los acuíferos o las ca-

vernas de sal. Por esta última opción apuestan dos de los prototipos en funcionamiento, uno localizado en Alemania y otro en Alabama (EE UU).

Los expertos de Sandia creen que el dispositivo CAES podría adosarse a otras instalaciones generadores de energía, por ejemplo, a centrales térmicas. En lugar de ajustar su actividad a las subidas y bajadas de la demanda, las centrales funcionarían a un ritmo óptimo constante, lo cual, aseguran, les permitiría reducir sus emisiones de CO_2.

b. Instalaciones CAES en parques eólicos

La misma idea de aire comprimido se puede utilizar en caso de los generadores eólicos. Si es por la noche cuando las necesidades energéticas son menores, la podemos almacenar en forma de aire comprimido.

La mayor pega de la energía eólica deriva del carácter caprichoso del viento. La intermitencia de este recurso limpio, autóctono e inagotable impide justamente que esta tecnología pueda garantizar el suministro eléctrico en los picos en los que más se necesita.



Figura 16: instalaciones CAES en parques eólicos.

Por esa razón, los investigadores se han venido devanando los sesos para encontrar la manera de 'almacenar el viento'. Existen ya proyectos que lo hacen por medio de agua o de hidrógeno, pero en EE UU se ensaya ahora una solución muy distinta: guardando aire comprimido en el subsuelo.

El viento sopla en algunas áreas cuando la electricidad no se necesita o donde el sistema de transmisión no puede aceptar toda la energía. El almacenamiento durante el horario de bajo consumo permite que esa energía que se ha acumulado sea suministrada cuando más se necesita. Así, puede proporcionarse más energía renovable de lo que sería posible sin el almacenamiento.

Las esperanzas actuales están puestas en el 'Iowa Storage Energy Park', un proyecto estadounidense en marcha, que cuenta con el respaldo tecnológico de los 'Sandia Nacional Laboratories'. Con la energía proporcionada por las aeroturbinas comprimirá y guardará aire en un acuífero situado a mil metros de profundidad en el centro del estado de Iowa, usado hasta ahora para atesorar gas natural. Se espera que en el futuro parque eólico, cuya construcción costará unos 130 millones de euros, suministre 270 MW durante 16 horas al día.

4.1.2.4. Calculador de fugas de aire comprimido

El Calculador de Ineficiencia de Aire Comprimido es la primera herramienta online que le permitirá conocer sus costos para producir Aire Comprimido, cuantificar las pérdidas generadas por las ineficiencias más habituales, y pronosticar los posibles ahorros energéticos que su sistema presenta.

Completando una variedad de datos de su Instalación de Aire, Ud. podrá conocer:

1. El costo en $ para producir Aire Comprimido.
2. El desperdicio aproximado en $ y en kW generado por rendimiento ineficiente de los compresores.
3. El desperdicio aproximado en $, kW y m^3/min generado por existencia de fugas en la instalación.
4. Los posibles ahorros energéticos por reducción de la presión del sistema.
5. Los posibles ahorros energéticos por optimización de los productos de soplado del sistema.
6. Los posibles ahorros energéticos por reducción de la temperatura del aire de alimentación.

4.1.2.5. Proyectos relacionados

- **Energy Bag, almacenamiento de energía en el fondo marino**

La empresa canadiense Thin Red Line Aerospace está realizando las primeras pruebas de un genuino sistema para almacenar energía en los campos eólicos marinos. La Energy Bag (bolsa de energía) almacena aire comprimido en el fondo marino y lo libera en función de la demanda para generar energía.

El proceso es conceptualmente muy sencillo: los aerogeneradores 'inflan' con aire comprimido los balones en el fondo marino, que luego ha de servir para hacer funcionar los generadores eléctricos. Aunque inicialmente el sistema fue concebido para los campos eólicos marinos, su uso también podría extenderse al almacenamiento de energía de las olas o de las mareas. Una tecnología que podrán explotar los países con aguas relativamente profundas cerca de sus costas.

http://www.ison21.es/2011/06/05/energy-bag-almacenamiento-de-energia-en-el-fondo-marino/

http://www.theengineer.co.uk/1008374.article

- **Turbina de disco solar con CAES**

CSP Today se pone al día con Jim Kesseli, presidente de Brayton Energy LLC, sobre el prototipo de turbinas que funcionan con discos solares y están siendo fabricadas en Phoenix, Arizona.

En los Estados Unidos, el volumen total de proyectos solares y eólicos que están actualmente desarrollándose ha desencadenado un renovado interés en el almacenamiento de grandes cantidades de energía mediante aire comprimido.

http://es.csptoday.com/qa/turbina-de-disco-solar-con-caes-para-suministrar-csp-escala-de-servicio-p%C3%BAblico

4.1.3. Volantes de inercia

Volante de inercia o volante motor es un elemento totalmente pasivo, que únicamente aporta al sistema una inercia adicional de modo que le permite almacenar energía cinética. Este volante continúa su movimiento por inercia cuando cesa el par motor que lo propulsa. De esta forma, el volante de inercia se opone a las aceleraciones bruscas en un movimiento rotativo. Así se consiguen reducir las fluctuaciones de velocidad angular. Es decir, se utiliza el volante para suavizar el flujo de energía entre una fuente de potencia y su carga.

El volante de inercia es, básicamente, un sistema de almacenamiento de energía mecánica. Su principal característica frente a otros sistemas es la capacidad de absorber y ceder energía en poco tiempo. Es adecuado para sistemas mecánicos de ciclo energético discontinuo donde el periodo de tiempo sea muy corto, por lo que, tradicionalmente, se ha utilizado en motores y compresores alternativos, prensas y troqueladoras, etc.
En volantes tradicionales la cantidad de energía es menor que en otros sistemas de almacenamiento, pero en las últimas décadas se fabrican de materiales compuestos, lo que ha supuesto un aumento notable de su capacidad de almacenamiento. Esta innovación permite aplicarlos a campos en los que antes era totalmente impensable, por ejemplo, para almacenamiento de energía en automóviles, trenes o autobuses, satélites, etc.



Figura 17: volantes de inercia.

Con este nuevo tipo de volantes se superan, en algunos aspectos, los sistemas clásicos de almacenamiento de energía. Por ejemplo, si se comparan con las tradicionales baterías químicas, los volantes ofrecen mayor potencia energética, tanto entregada como absorbida. Las baterías, debido a su proceso químico, son muy lentas en el proceso de carga y descarga, y si se pretende disminuir el tiempo su rendimiento desciende a valores del 20 o el 30%.

Para comparar los acumuladores cinéticos con otros sistemas de almacenamiento se utilizan los conceptos de densidad de energía y de densidad de potencia para expresar la capacidad de almacenar y de intercambiar energía por unidad de masa del acumulador.

4.1.3.1. Baterías inerciales

Una batería inercial es un acumulador eléctrico que almacena energía en forma de energía cinética, utilizando para ello un volante o disco giratorio. Con electricidad se aceleran los discos que se cargan de energía, cuando el motor que los propulsa se apaga el volante continúa su movimiento por inercia lo que le permite generar electricidad.

Con base en este principio se ha diseñado un sistema que:

- Almacena mucha energía utilizando un disco con mucha masa, de gran diámetro o que gira a gran velocidad.
- No pierde su energía con rapidez. Se consigue eliminando los rozamientos. Para reducir la fricción se utilizan cojinetes magnéticos, que evitaban todo contacto, y se hace el vacío en la cámara que contiene el disco.

El material más adecuado para fabricar el disco es la fibra de carbono. Aunque tiene menor densidad que el acero, es más resistente y puede girar a mayor velocidad, hasta 100.000 rpm.
Sólo falta que un sistema eléctrico acelere el disco para cargarlo de energía y lo decelere para hacerle devolver su energía.

4.1.3.2. Fluctuaciones

Se dice que existen fluctuaciones de tensión cuando se producen variaciones periódicas o series de cambios aleatorios en la tensión, su duración va desde varios milisegundos hasta unos 10 s y con una amplitud que no supera el +/- 10% del valor nominal.
Investigadores estadounidenses han desarrollado un algoritmo que podrá mitigar el problema de la fluctuación en los aerogeneradores, utilizando la inercia de estos como una especie de almacenaje de energía.

Éste sería un método de control que puede mitigar las fluctuaciones utilizando la inercia de los rotores de las turbinas eólicas como una especie de almacenaje. O sea, han desarrollado un algoritmo que ajusta la velocidad del rotor para que cuando el viento sea más fuerte que el promedio, se le permita al rotor girar más rápido, así puede luego almacenar ese exceso como energía cinética en vez energía eléctrica. Esta energía cinética o de movimiento luego es liberada cuando la velocidad del viento es más baja que la media. Éste método reduce la cantidad de turbinas eólicas necesarias en un sitio dado, ya que es más eficiente el uso de cada una.


Figura 18: componentes nacelle turbina eólica.

Las fluctuaciones se clasifican en 4 tipos:

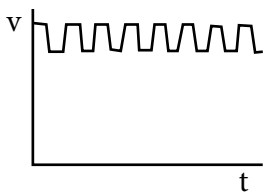
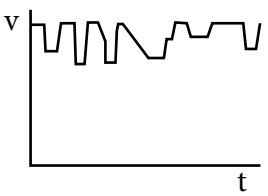
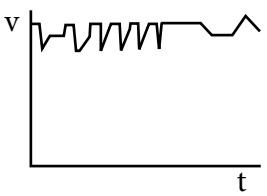
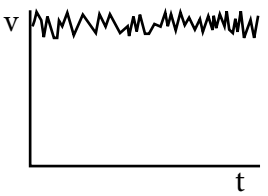
TIPO A	TIPO B	TIPO A	TIPO B
			
Variaciones rectangulares de tensión de período constante	Escalones de tensión que se presentan de forma irregular en el tiempo y cuya magnitud varía tanto en sentido + como -	Cambios en la tensión claramente separados que no siempre llevan aparejados escalones de tensión	Series de fluctuaciones esporádicas o repetitivas

Tabla 3: tipos de fluctuaciones.

4.1.3.3. Acumuladores inerciales

El depósito de inercia se utiliza como acumulador de calor para sistemas de calefacción o de instalaciones grandes de ACS. El calor producido por medio de energía solar o de una caldera se transmite al depósito a través de un intercambiador o a través de un intercambiador de placas, este calor se puede extraer por medio de otros intercambiadores y así calentar el ACS o ser utilizado para la calefacción de edificaciones. En caso de ser necesario se pueden conectar los depósitos en serie o en paralelo, según las necesidades de volumen o las condiciones de espacio.

4.1.3.4. Proyectos relacionados

- **Sistema de red aislado ENERCON**

Los aerogeneradores ENERCON de hasta 800 kW de potencia nominal son idóneos para operar en islas o en pequeños municipios rurales como complemento de los generadores diesel, que son usados normalmente para el abastecimiento de energía.

Con el fin de aprovechar al máximo la energía eólica dentro de este combinado de energías (funcionamiento paralelo-viento-diesel), ENERCON ha desarrollado componentes adicionales para la estabilización de la red y el control del sistema. Según la estructura del sistema, esto es, según el porcentaje existente entre potencia nominal del aerogenerador y la demanda de energía, se hace posible, gracias a la ayuda del sistema aislado de ENERCON (funcionamiento sin generadores diesel, ausencia de emisiones).

http://www1.enercon.de/es/inselnetzsystem.htm

4.1.4. Bibliografía almacenamiento mecánico

- **Bombeo hidráulico**

  - http://es.scribd.com/doc/54554614/bombeo-hidraulico-parte-2
  - http://www.monografias.com/trabajos63/metodos-levantamiento-artificial/metodos-levantamiento-artificial4.shtml
  - http://sitioniche.nichese.com/acumulador.html

- Aire comprimido

  - http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica2.htm
  - http://es.scribd.com/doc/50110024/20/Acumulador-de-aire-comprimido
  - http://www.caballano.com/aire_comprimido.htm
  - http://todoproductividad.blogspot.com/2010/10/nueva-tecnologia-para-almacenamiento-de.html
  - http://www.pnu-power.com/products/100-200kw/
  - http://www.pnu-power.com/products/1mva/
  - http://www.biocarburante.com/almacenamiento-de-energia-en-aire-comprimido/
  - http://www.portalsolar.com/energia-eolica-se-podria-almacenar.html

- Volantes de inercia

- http://es.wikipedia.org/wiki/Volante_de_inercia
- http://www.buenastareas.com/ensayos/Monografis/1426481.html
- http://es.scribd.com/doc/48735200/ANALISIS-Y-DISENO-DE-VOLANTES-DE-INERCIA-DE-MATERIALES-COMPUESTOS
- http://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa_inercial
- http://desenchufados.net/almacenando-energia-en-el-rotor-de-los-aerogeneradores/
- http://www.donsion.org/calidad/cc5/C5-1.pdf
- http://www.solarweb.net/forosolar/solar-termica/4732-acumuladores-inercia.html

4.2. Almacenamiento químico y electroquímico

4.2.1. Hidrógeno

Es el elemento más ligero, la molécula de hidrógeno se caracteriza por tener un pequeño tamaño y peso molecular. En condiciones normales, 1atm y 0 grados, en un volumen de 1m^3 tenemos 90 gramos de hidrógeno. De ahí su principal desventaja, su bajo poder calorífico por unidad de volumen pero en contraposición tiene un elevado poder calorífico por unidad de masa.

4.2.1.1. Características

Las principales características del hidrógeno son:

**destacar el bajo punto de ebullición que es a 20K (-2530C*

Densidad del hidrógeno gas	0.0899 kg/Nm^3
Densidad del hidrógeno líquido	0.0708 kg/L
Densidad energética del hidrógeno gas	10.8 MJ/Nm^3
Densidad energética del hidrógeno líquido	8.495 MJ/L
Punto de ebullición	20.28 K
Punto de fusión	14.02 K
Poder calorífico inferior PCI hidrógeno gas	119.972 MJ/kg
Poder calorífico superior PCS hidrógeno gas	141.890 MJ/kg
Poder calorífico inferior PCI hidrógeno líquido	10.783 MJ/Nm^3
Poder calorífico superior PCS hidrógeno líquido	12.745 MJ/Nm^3
Límites de explosión	4 – 75% de H_2 en el aire
Límites de detonación	18.3 – 59.0% de H_2 en el aire
Temperaturas de combustión espontánea	858 K
Capacidad calorífica específica	Cp = 14.33 J/(kgK) Cv = 10.12 J/(kgK)
Coeficiente de difusión	0.61 cm^2/s
Incoloro, inodoro e insípido No es tóxico, ni contaminante, ni corrosivo, ni cancerígeno, ni radioactivo No es explosivo, ni tiene autoignición, ni se descompone Es más ligero que el aire y se diluye rápidamente hacia arriba Tiene una llama prácticamente invisible	

Tabla 4: caracteríscticas del hidrógeno.

Relación del poder calorífico del hidrógeno por unidad de peso: 1 Kg de hidrógeno equivale 3 Kg de gasolina.

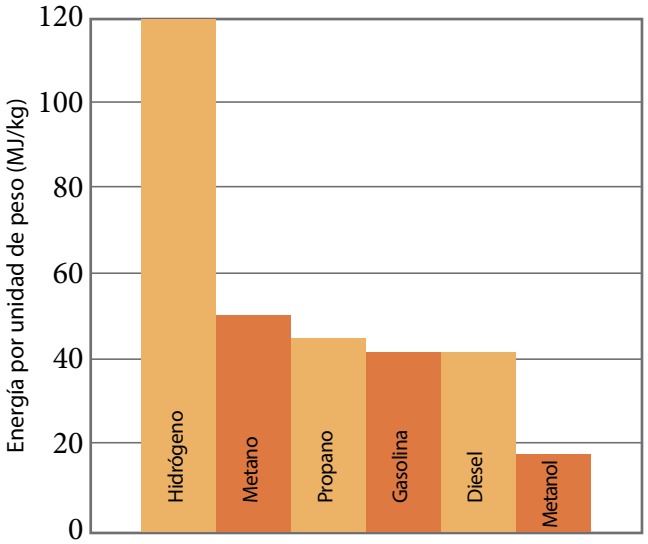


Figura 19: energía por unidad de peso (kg) de distintos combustibles.

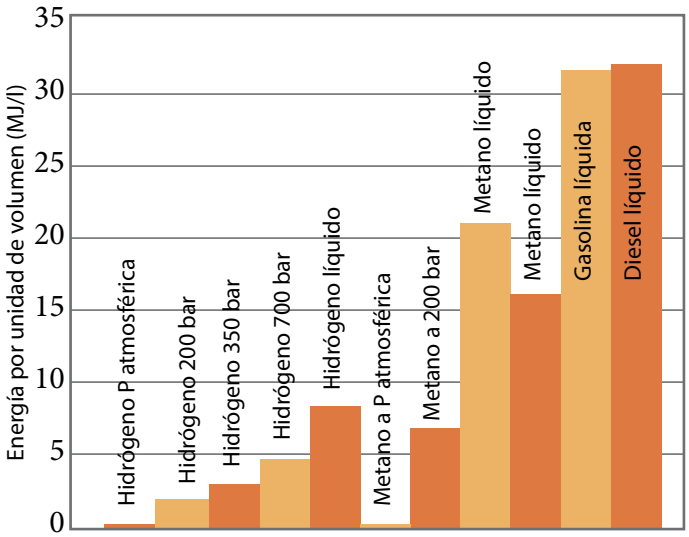


Figura 20: energía por unidad de volumen (l) de distintos combustibles.

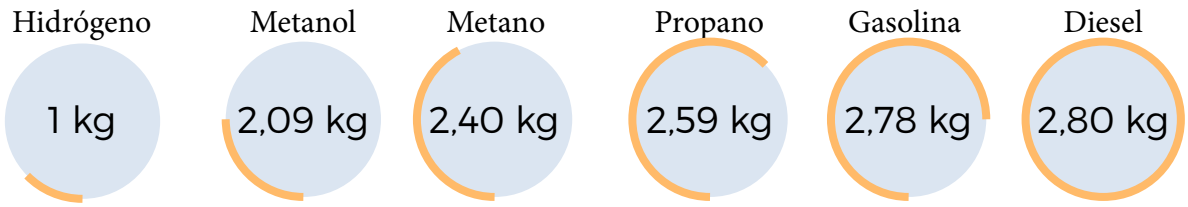


Figura 21: comparativa de masa entre distintos combustibles

Hay que observar que el volumen no disminuye de forma proporcional al aumento de presión, el hidrógeno gas a altas presiones tiene un comportamiento de gas real, diferente al comportamiento de gas ideal válido para bajas y medias presiones. Para calcular la cantidad de hidrógeno a un determinado volumen y presión se debe usar el factor de compresibilidad. Cuanto más se aleje de 1, tanto más se aleja el comportamiento de la idealidad.

El factor de compresibilidad se define como:

Factor compresibilidad =[Volumen geométrico (L)*Presión (bar)] / Cantidad de hidrógeno (Nm^3) .

Y los valores son los siguientes:

Factor de compresibilidad según presión

	Presión (bar)				
	1	100	200	300	400
Factor compresibilidad	1	1,065	1,132	1,201	1,272
500	600	700	800	900	1000
1,344	1,416	1,489	1,56	1,632	1,702

Tabla 5: factor de compresibilidad.

Debido a ello es necesario encontrar soluciones para aumentar su densidad energética de forma segura y económica que permitan ofrecer unos costes de distribución asumibles y unas autonomías para las diversas aplicaciones, transporte, móviles y estacionarias, equiparables a las actuales.
El objetivo de un sistema de almacenamiento de hidrógeno es aumentar la densidad, de forma que se tenga la máxima cantidad posible de masa en el menor volumen. Las soluciones adoptadas: comprimir el gas aumentando la presión, licuar el gas en forma criogénica o pasando el hidrógeno a formar parte de un

compuesto sólido (por absorción o adsorción) con diferentes tipos de enlaces químicos.
Adsorción: *atracción de las moléculas o iones de una sustancia en la superficie de otra.*
Absorción: *atracción de las moléculas o iones de una sustancia en el interior de otra.*

- Tipos de almacenamiento:

  - Gas comprimido
  - Gas líquido
  - Estado sólido



Figura 22: fórmula química del hidrógeno.

El almacenamiento de hidrógeno gaseoso comprimido necesita de altas presiones en los depósitos mientras que el líquido necesita de depósitos criogénicos.

4.2.1.2. Almacenamiento de hidrógeno gas comprimido

Es el más extendido, con bajos costes tanto del proceso de compresión como de los componentes y equipos asociados. La principal desventaja es el manejo a elevadas presiones y los problemas de seguridad que puede llevar asociados. Toda esta evolución se ha conseguido con el desarrollo de depósitos cada vez mejores, que se clasifican de acuerdo al material que lo compone y su estructura:

- **TIPO 1:** Estructura metálica
- **TIPO 2:** Estructura metálica embobinada solo circunferencialmente, con una resina de materiales compuestos de fibras de carbono.
- **TIPO 3:** Estructura metálica totalmente embobinada con una resina de materiales compuestos por fibras de carbono.
- **TIPO 4:** La estructura la componen polímeros de alta densidad (p.e. polietileno de alta densidad) y está totalmente embobinado con fibra de carbono.

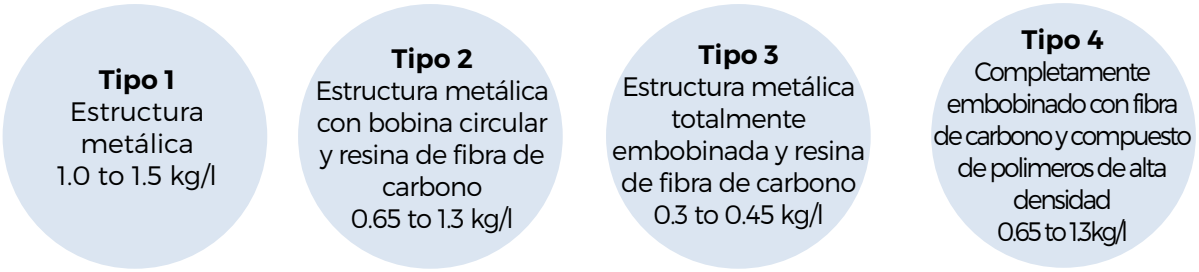


Figura 23: tipos de estructuras.

La mayoría de los cilindros metálicos son de acero inoxidable austenítico y aleaciones de cobre o aluminio, los cuales son inmunes a los efectos del hidrógeno a temperatura ambiente.

> El acero austenítico posee excelente dureza y resistencia a la corrosión y se puede fabricar bien. Posee bajo contenido en carbono mejorando su resistencia a la corrosión en estructuras soldadas.

El armazón de fibra de carbono se coloca sobre la estructura, denominado frecuentemente como ‘’liner” y constituye el componente que soporta la presión del depósito y la resistencia al impacto y al desgaste.

Este tipo de sistema de almacenamiento ha ido evolucionando de acuerdo a los objetivos:

- **Disminuir** el peso total del sistema introduciendo materiales más ligeros como son las fibras de carbono y los polímeros.

- **Aumentar** los ciclos de vida y por tanto la seguridad del mismo. Aumentar la resistencia a corrosión y el desgaste con la presencia de fibra de carbono, siendo más óptimo cuando recubre totalmente el depósito.
- **Aumentar** la presión de trabajo es decir, la presión capaz de soportar los depósitos. Si se trabaja con materiales metálicos la resistencia a la tensión la marca el espesor de la pared, el límite establecido con este tipo son 200 bar y si se refuerzan con aleaciones pueden llegar a trabajar hasta 300 bar. Con los depósitos de polímetros se llega a alcanzar los 700 bar.

Los sistemas de seguridad hacen que se tienda a que los futuros recipientes a presión tengan tres capas, que serán el liner interior polimérico embobinado en un material compuesto de fibra de carbono soportando la presión y una capa más externa de fibras de aramida, también denominada KEVLAR por su nombre de la patente (poliamida aromática) que soporta los ataques mecánicos y de abrasión. Las aramidas son fibras sintéticas con una fuerte resistencia al calor y a la abrasión.

Los esfuerzos que están realizando sobre todo son en la identificación de fibras de carbono de bajo coste que cumplan las especificaciones de resistencia, peso, ciclos de vida y seguridad.
Dos nuevas tendencias en búsqueda de aumentar la capacidad de almacenamiento:

- Desarrollo de **tanques crio-comprimidos** que se basa en el hecho que fijando una presión y un volumen en un tanque, la capacidad de almacenamiento de gas en el tanque aumenta cuando disminuye la temperatura de este tanque. De forma que refrigerando el tanque desde temperatura ambiente hasta temperatura del nitrógeno criogénico líquido (77K), su capacidad volumétrica se incrementa por un factor de 4, aunque realmente el aumento de capacidad volumétrica es menor ya que es necesario incluir un sistema de refrigeración.
- Desarrollo de **tanques adaptables**, asimilándolos a los actuales tanques, el desarrollo se basa en la localización de paredes de soporte estructurales.

Las principales empresas que desarrollan éstos depósitos de fibras de carbono son: Quantum Technologies, Lincoln Composites y Dynatek.

350 y 700 bar son los estándares de presión de uso certificados a nivel mundial: ISO 11439 (Europa), NGV-2 (U.S.), Reijikijun Betten (Iceland), TÜV (Germany), KHK The High-Pressure Gas Safety Institute of Japon. Diseñados para trabajar a 700 bar de acuerdo a las especificaciones de EIHP (European Integrated Hydrogen Project) cuyo factor de seguridad es de 2,345. Los depósitos diseñados tienen que soportar 1645 bar de presión (presión estallido).

4.2.1.3. Hidrógeno líquido criogénico

La densidad energética del sistema mejora cuando el hidrógeno se almacena en forma de hidrógeno líquido:

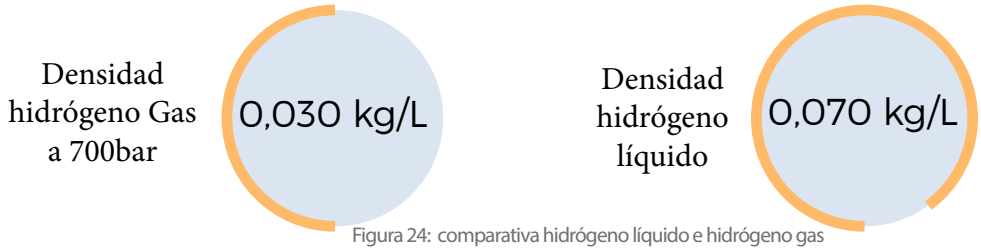


Figura 24: comparativa hidrógeno líquido e hidrógeno gas

El hidrógeno pasa a estado líquido a -253ºC, existiendo en dicha forma solo por debajo de las condiciones del punto crítico, 12,8 bar y 33 K.

Los puntos clave de esta tecnología son los asociados al efecto de mantenerlo a temperaturas criogénicas. Los principales problemas son los siguientes:

- **Efecto "boil-off":** pérdida de hidrógeno por evaporación. Debido a las temperaturas a las que trabaja se producen pérdidas energéticas, que se traducen en una progresiva evaporación del hidrógeno que está almacenado. Este hidrógeno se va acumulando en el interior del depósito pero debe ser venteado para evitar sobrepresiones. Este efecto debe ser minimizado estando en la actualidad en torno al 3-5% de hidrógeno evaporado al día, pero debe disminuirse con el fin de conseguir sistemas más eficientes y mejorar las condiciones de seguridad.
- **La energía necesaria en el proceso de licuefacción** es elevada, necesitándose en torno al 30% de la energía que contiene el hidrógeno, pudiendo llegar a ser este gasto energético mayor en pequeñas plantas de licuefacción ya que son menos eficientes.
- Los **materiales** con los que trabaja, asimismo como los sistemas de aislamiento, suponen un gran peso y volumen para el sistema total. Deben ser optimizados para mejorar coste, volumen, peso y aislamiento del exterior.

Los recipientes de hidrógeno líquido se componen principalmente:

- Un depósito interior
- Un sistema de aislamiento intermedio
- Un armazón exterior.

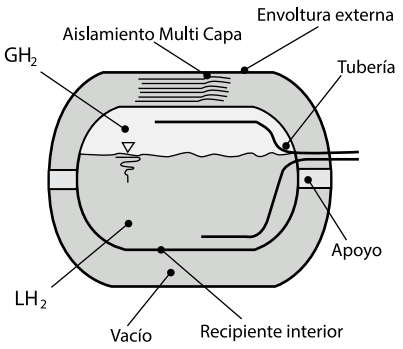


Figura 25: tanque de hidrógeno líquido.

El depósito interior tiene que ser resistente al efecto de fragilización del hidrógeno, impermeable al hidrógeno y resistente a las temperaturas de operación (20k). Además, a causa de los grandes cambios de temperatura cuando el depósito está lleno o vacío, hay que tener en cuenta la expansión y contracción del material.

Respecto a la capa de aislamiento intermedia, puede ser de dos tipos:

- Mediante chapeta de aislamiento a presión de vacío consistente en capas de Mylar, aluminio u otro compuesto con una baja emisividad y alta reflectividad, separadas por capas de fibra de vidrio. Teniendo baja presión se consigue disminuir la convección entre capas, así mediante las capas de aluminio se reduce la radiación y el vidrio reduce la conducción del calor.
- Mediante asilamiento rígido de espumas (foam). Presenta menos problemas de seguridad pero la conductividad térmica es mayor.

El armazón exterior es de acero o aluminio y debe presentar una alta resistencia a la abrasión.



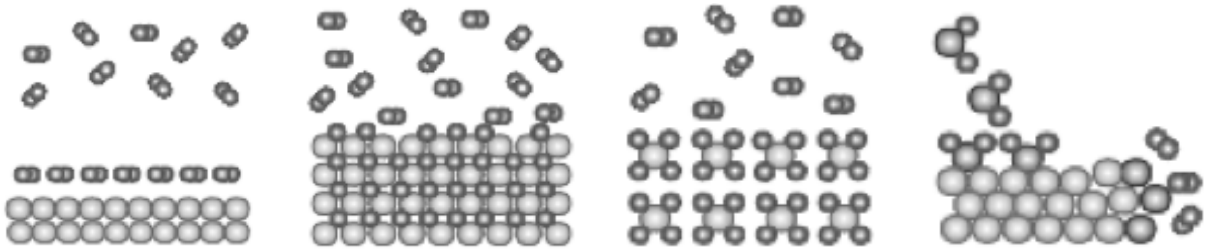
Figura 26: armazón de un tanque de hidrógeno líquido.

4.2.1.4. Almacenamiento sólido de hidrógeno

El almacenamiento por hidruros metálicos presenta un modo compacto, intermedio en peso. Se denomina almacenamiento sólido a aquel en el que la molécula de hidrógeno pasa a formar parte de un sustrato sólido debido a un mecanismo, que puede ser principalmente de tres tipos:

- Fisisorción o adsorción de hidrógeno en materiales en su superficie.

- Absorción de hidrógeno en hidruros metálicos o hidruros complejos. Los átomos de hidrógeno se intro ducen en el interior del material, ocupando los intersticios.
- Mediante reacción química, almacenamiento de hidrógeno basado en metales y agua.



Hidrógeno adsorbido en superficies o fisisorción
Nanotubos de carbono, MOFs, zeolitas

Hidrógeno adsorbido
Hidruros metálicos convencionales (LaNi5. TiFe,...)
Hidruros metálicos ligeros (Mg)

Hidrógeno adsorbido
Hidruros complejos (Alanatos: NaAlH4, boratos, etc.)

Reacciones químicas

Figura 27: tipos de almacenamiento sólido.

a. Adsorción

En este proceso, las moléculas de hidrógeno gas interaccionan con las moléculas o átomos de la superficie del material, que puede ser sólido o líquido.

En este tipo de sistema, **la capacidad de almacenar el hidrógeno es proporcional a su superficie**. De ahí que se esté trabajando con materiales que tengan una alta superficie específica como son los materiales basados en carbono más concretamente los nanotubos de carbono, aerogeles o nanofibras así como las estructuras órgano metálicas. También se está trabajando en nuevas estructuras como son los polímeros conductores y los clatratos.

Actualmente la cantidad máxima de hidrógeno almacenada en estos materiales es entorno al 3% en peso a bajas temperaturas (77K) y el objetivo es obtener una capacidad de almacenamiento del 6% en peso a temperatura ambiente.

La principal ventaja se este tipo de almacenamiento mediante fisisorción son las bajas presiones de operación, el bajo coste de los materiales (carbono) y el simple diseño que tienen el sistema completo de almacenamiento, sin embargo presenta una baja densidad de almacenamiento en peso y en volumen (si se compara con el del recipiente), además de necesitar bajas temperaturas (77K) para alcanzar el óptimo, lo que actualmente lo hacen impracticable frente a otras alternativas.

El principal atractivo de los nanotubos de carbono reside en el potencial de almacenamiento, en un futuro llegaría en torno al 10% en peso a temperatura ambiente, siendo además reversibles. Es reversible porque el hidrógeno se libera aumentando la temperatura a una presión dada, posteriormente el hidrógeno se vuelve a acumular mediante control de temperatura y presión.

Recientemente se están desarrollando nuevos materiales reversibles con alta superficie específica, como son los materiales microporosos de estructuras órgano metálicas MOFs. Son materiales sintéticos y cristalinos que están compuestos por grupos de óxidos metálicos unidos a estructuras orgánicas como por ejemplo el Zn4O pudiendo llegar a 4% en paso a 77K y al 1% en peso a temperatura ambiente.

Nanotubos de carbono

Son unos materiales formados únicamente por carbono, donde la unidad básica es un plano grafítico enrollado que forma un cilindro, formando unos tubos cuyo diámetro es del orden de algunos nanómetros.

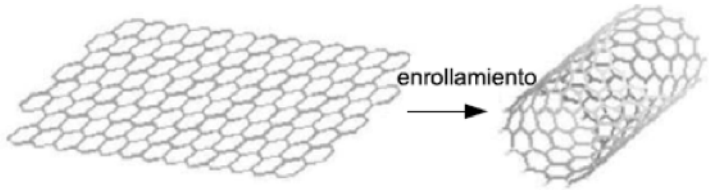


Figura 28: plano grafítico enrollado.

Son sistemas ligeros, huecos y porosos que tienen alta resistencia mecánica, y por tanto, interesantes para el reforzamiento estructural de materiales y formación de composites de bajo peso, alta resistencia a la tracción y enorme elasticidad

b. Absorción

El hidrógeno reacciona a elevadas temperaturas con muchos metales de transición y sus aleaciones, formando hidruros metálicos. Son especialmente interesantes los hidruros metálicos de sistemas ternarios (hidruros mixtos o complejos), con la estructura ABxHn, ya que variando la aleación de elementos se varían las propiedades de los hidruros. El elemento 'A' suele ser un metal alcalino del grupo I de la tabla periódica o elementos de las ''tierras raras" (grupo de 17 elementos químicos con números atómicos 21,39 y del 57 al 71) del grupo de los lantinidos. El elemento 'B' suelen ser metales de transición y forma solo hidruros inestables. Los ratios A:B normales suelen ser x=0.5,1,2,5.

Los principales grupos de los hidruros candidatos al almacenamiento de hidrógeno se denominan como AB (TiFe-H2), AB5(LaNi5-H6) y A2B (Mg2Ni-H4). Cada grupo tiene sus características especiales. Los AB presentan un menor coste, los A2B son más ligeros y los AB5 muestran poca histéresis, tolerancia a las impurezas y fácil hidrogenación además los dos grupos tienen presiones de equilibrio de unos poco bares hasta 1000C.

Histéresis: fenómeno de inercia por el cual un material ofreciendo resistencia a un cambio, tiene una tendencia a conservar sus propiedades. Haciendo que el proceso de variación sea distinto en un sentido que en el contrario.

El almacenamiento se produce del siguiente modo: al principio el metal está libre de hidrógeno, a una temperatura dada el hidrógeno se disuelve en la fase metálica aumentando la presión. Conforme aumenta la presión los incrementos en el contenido de hidrógneo son cada vez menores hasta que el material puede considerarse cargado. En la descarga la presión disminuye de manera que debe suministrarse calor si se quieren mantener condiciones isotermas de reversibilidad. Sin embargo, aun en el mejor de los casos, se produce un efecto de histéresis.

La reacción de hidrógeno gas con un metal es un proceso de absorción en el cual los átomos de hidrógeno ceden un electrón a la estructura metálica. Este proceso es endotérmico por lo que desprende calor cuando el hidrógeno es absorbido en el material y necesita calor (se enfría) cuando el hidrógeno se desorbe. Esto implica la necesidad de un sistema de refrigeración para el control óptimo del proceso.

Estos sistemas se caracterizan por tener una ***alta densidad energética por unidad de volumen*** (tiene gran cantidad de hidrógeno almacenado en poco volumen) sin embargo tienen una ***baja densidad energética por unidad de masa*** (son sistemas muy pesados) por lo que se hacen adecuados para aplicaciones estacionarias donde el peso no es primordial y no son tan adecuados para aplicaciones móviles.

Estos sistemas tienen un gran potencial para conseguir superar a los sistemas de gas comprimido en densidad energética eliminando los problemas de seguridad asociados al almacenamiento a presión y trabajar a temperatura criogénicas.

c. Reacción química

Este tipo de almacenamiento engloba las tecnologías en las cuales el hidrógeno gas es obtenido a partir de una reacción química en la que participan reactivos ricos en hidrógeno como son los hidruros químicos (NaBH4) y alcoholes (R-OH).

La difilcutad se encuentra en el hecho de la reversibilidad, y que la recarga de estos sistemas debe realizarse fuera de las aplicaciones en una planta especializada. Las principales reacciones en este campo son las reacciones de hidrólisis y las recciones de hidrogenación.

c.1. Hidrólisis

En ella tiene lugar la oxidación de hidruros químicos con agua para producir hidrógeno. La más común en este campo es la reacción del hidruro de boro sódico:

$$NaBH_4 + 2H_2O = NaBO_2 + 4H_2$$

En la primera fase, una suspensión de líquido inerte estabilizante protege al hidruro de entrar en contacto con el agua y hace al hidruro manejable. En el momento de uso del hidrógeno, la suspensión se mezcla con agua y se produce hidrógeno puro. La reacción se controla a través de pH y del catalizador.

Catalizador: sustancia que altera la velocidad (retarda o acelera) de una reacción química sin sufrir en sí ningún cambio químico. Los catalizadores no alteran el balance energético final de la reacción química, sino que sólo permiten que se alcance el equilibrio con mayor o menor velocidad.

Este tipo de almacenamiento se caracteriza por tener gran capacidad de almacenar hidrógeno y tener una cinética rápida. En cambio la regeneración del borohidruro es compleja, y se debe realizar fuera de la aplicación. Los puntos clave de investigación son la energía necesaria para la regeneración, el coste y los ciclos de vida del material.

c.2. Hidrogenación y deshidrogenación

Estas reacciones han sido estudiadas durante muchos años. La más común es la reacción de la decalina para formar naftaleno, pudiendo llegar al 7,3% en peso a 210 ºC.

Tiene lugar sobre catalizador soportado sobre platino o metales nobles para controlar la cinética de la reacción.

Recientemente, Air Products and Chemical ha realizado un profundo estudio y ha obtenido un material óptimo para este tipo de reacciones, consiguiendo una densidad gravimétrica del 5-7% y una densidad columétrica entorno a 0,05kg/l. las investigaciones actuales están encaminadas a disminuir la temperatura de deshidrogenación.

$$C_{10}H_{18} = C_{10}H_8 + 5H_2$$

Las principales ventajas en estos sistemas es que no se necesita agua y se trabaja en estado líquido, sin embargo es **necesaria la hidrogenación en una planta especializada.**

Destacar alternativas más avanzadas en investigación:

- Las zeolitas, sustancias porosas, rocosas que operan como esponjas moleculares, tienen una red de túneles y celdas que pueden atrapar el hidrógeno en forma aproximadamente líquida sin mucha criogenia.
- NASA Sacco, las nano estructuras de magnesio (universidad autónoma de madrid), sistema especialmente ventajoso en unidades eléctricas estacionarias de zonas apartadas donde la generación es local.

4.2.1.5. Comparación de los sistemas

	VENTAJAS	INCONVENIENTES
GAS COMPRIMIDO	Más desarrollada Menor coste	Baja densidad energética Altas presiones necesarias
LÍQUIDO	Alta densidad energética	Debido a las temperaturas de trabajo: materiales, seguridad, coste energético
SÓLIDO	Gran capacidad de almacenamiento a bajas presiones	Alto peso del sistema En desarrollo

Tabla 6: comparación de sistemas de almacenamiento químico según su estado.

Hidrógeno			
Densidades energéticas			
Combustible	kWh/kg	kWh/l	Tanque
Nafta	12,7	8,8	1,0
Metano	13,8	1,7	5,2
Metanol	6,3	4,4	2,0
$H_{2(liq)}$	33,3	2,4	3,7
$H_{2(gas,170\ atm)}$	33,3	0,6	14,6
$Hidruro_{(feti)}$	0,6	3,2	2,8
$Hidruro_{(LaNi5)}$	0,4	3,3	2,7

Tabla 7: densidades energéticas.

- **Los seis métodos y fenómenos de almacenamiento de hidrógeno**

Método de almacenamiento	r_m [H% masa]	r_V [kg H/m³]	T [°C]	P [bar]	Fenómeno y observaciones
Cilindros de gas a alta presión	<2 a 10	10 a <40	25	130 a 800	Gas comprimido (H_2 molecular), en cilindros de acero o material compuesto, resistencia a la tracción 200 Mpa
Hidrógeno líquido tanques criogénicos	depende del tamaño	70,8	-252	1	H_2 Líquido (molecular), pérdida continua poco % de H_2 T_{amb}
Hidrógeno Adsorbido [1]	>>2	20	-80	100	Fisisorción (H_2 molecular) sobre materiales de gran área específica totalmente reversible
Absorbido en sitios intersticiales de un metal [2, 3] (Hidruro metálico)	>>2	150	25	1	Hidrógeno (H atómico) intercalado en metal anfitrión, los hidruros metálicos a T_{amb} son totalmente reversibles
Compuestos complejos [4, 5]	<18	150	>100	1	Compuestos complejos ($[AlH_4]$), $[BH_4]$. Desorción a T elevada, absorción a altas preciones
Metales y complejos junto con agua	<40	150	25	1	Oxidación química de metales con agua y liberación de hidrógeno, no directamente reversible

Tabla 8: metodos y fenómenos de almacenamiento de hidrógeno.

r_m = densidad gravimétrica r_v = densidad volumétrica

- **Comparativa energética de combustibles**

	Gasolina	Gasóleo	Metano	Gas natural	Metanol
1 kg H_2	2,78 kg	2,80 kg	2,40 kg	2,54 - 3,14 kg	6,09 kg
1 L H_2 liq	0,268 l	0,236 l	-	-	0,431 l
1 L H_2 (350 bar)	0,0965 l	0,085 l	0,24 1	0,31 l	0,24 1

Tabla 9: comparativa energética de combustibles.

4.2.1.6. Proveedores

- **Compañía distribuidora de tanques, la india (HIDRÓGENO GAS)**
  - http://www.bharattanks.net/LPG_Product.htm
  - http://www.indiamart.com/company/3475928/tanker.html
  - http://www.isisan.com.tr/products/detay.aspx?SectionID=n9xMRpol96pWlBIsoC15%2bg%3d%3d&ContentId=yk92UI0SwsW5krJy%2bs4fuQ%3d%3d

- **Quantum Technologies (HIDRÓGENO GAS)**
  - http://www.qtww.com/tanks

- **Lincoln Composites (HIDRÓGENO GAS)**
  - http://lincolncomposites.com/products/tuffshell-hydrogen-fuel-tanks/

- **Tanto gas como líquido, muy interesante.**
  - http://oliver.primary.co.uk/airproducts/HES/index.html?code%3D4066%3Bdate%3D2011-07-07%3Bseqno%3D1473851
  - http://www.airproducts.co.uk/bulkgases/hydrogen_equipment.htm
  - http://www.carburos.com/productos_sectores/gases_hidro.html

- **Empresa española hidrógeno líquido**
  - http://www.lapesa.es/default.asp?level=0203
  - http://galaxywire.net/2009/07/17/nasa-stirs-up-the-first-development-dome-welds-for-ares-i-upper-stage/

- **Distribuidora de tanques de hidrógeno líquido**
  - http://www.cryogenmash.ru/en/content/news/index.ph

- **Empresa francesa de hidrógeno sólido**
  - http://www.pragma-industries.com/products/hydrog

- **Empresa española de hidrógeno sólido**
  - http://www.casavonen.com/CartaClientes.htm

- **Empresa española de hidrógeno sólido**
  - http://www.mcphy.com/en/index.php

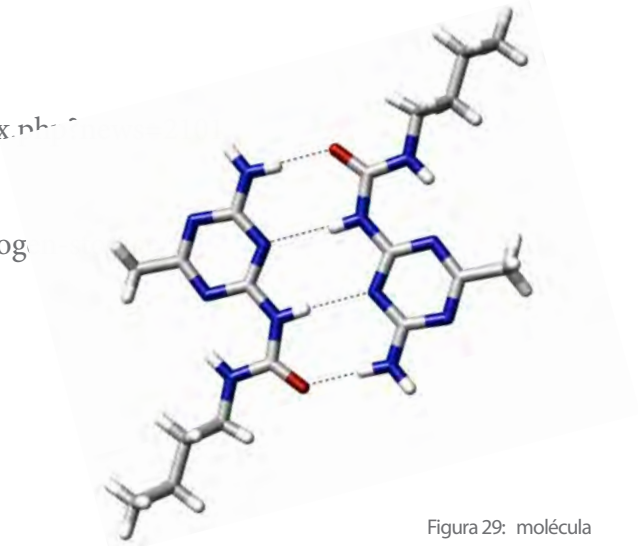


Figura 29: molécula

a. Gas comprimido

- **Primer vuelo de avión propulsado por hidrógeno comprimido.**

Solo ha sido un minuto pero es un primer vuelo que permite ser optimistas. Un pequeño avión teledirigido del Instituto de Tecnología de Georgia ha sido el primero en volar utilizando motores eléctricos y teniendo como única fuente de energía, una célula de combustible alimentada por hidrogeno comprimido.

La célula de combustible utiliza la tecnología conocida como membrana de intercambio de protones. Su potencia es pequeña, apenas 500 Vatios. Lo suficiente para alimentar cinco bombillas incandescentes potentes o una centésima parte de la potencia de un automóvil convencional. Aunque el vuelo de prueba ha sido corto, se espera disponer de un modelo capaz de cruzar el Océano Atlántico en unos cinco años. Y no son los únicos en esta carrera.

http://www.xatakaciencia.com/tecnologia/primer-vuelo-de-un-avion-propulsado-por-hidrogeno-comprimido

- **Central eléctrica de hidrógeno que aprovecha el poder solar.**

El nuevo proyecto de SolarLab Investigación y Diseño es un motor de hidrógeno que utiliza energía solar para generar hidrógeno. Diseñado para aprovechar el agua de mar, una pila de combustible y placas solares para generar hidrógeno. Este último es bombeado a los tanques de hidrógeno cuidadosamente inflado y montado en el fondo del mar.

Debido al efecto de enfriamiento por agua, la eficiencia de la planta se incrementa en un 30% y la temperatura de funcionamiento se reduce significativamente.

Las posibilidades de una explosión se limitan a cero porque el hidrógeno se reúne bajo el agua. El hidrógeno producido es entonces dispensado en un ambiente frío, bajo el agua a presión a través de una tubería de hidrógeno.

http://www.solarlab.org/

- **Un nuevo sistema mejora la eficiencia en el almacenamiento de hidrógeno.**

Basado en la aplicación de un campo eléctrico, podría favorecer el desarrollo y difusión de esta fuente energética alternativa.

Un grupo internacional de ingenieros e investigadores ha avanzado en un nuevo principio para el diseño de materiales utilizados en el almacenamiento de hidrógeno, empleando un campo eléctrico externo que, al aplicarse, optimizaría las condiciones de almacenamiento y posterior utilización del hidrógeno. Vale recordar que este punto es uno de los principales escollos que impiden un mayor desarrollo de esta energía alternativa.

La aplicación de un campo eléctrico podría mejorar significativamente el almacenamiento de hidrógeno, una de las principales limitaciones que tiene esta energía, considerada como la más viable de las fuentes energéticas alternativas desde diferentes puntos de vista. Así lo demostraría un trabajo de investigación

desarrrollado por un grupo de ingenieros e investigadores de la Virginia Commonwealth University, la Universidad de Pekín y la Academia de Ciencias de China en Shanghai
http://www.tendencias21.net/Un-nuevo-sistema-mejora-la-eficiencia-en-el-almacenamiento-de-hidrogeno_a4093.html

- **Desarrollo de un tanque ultra ligero de combustible de hidrógeno**

http://fuelcellsworks.com/news/2011/06/30/applied-nanotech-receives-department-of-energy-contract-to-develop-ultra-lightweight-hydrogen-fuel-tanks/

b. Hidrógeno líquido

- **Mercedes-Benz ya ha completado la vuelta al mundo con sus modelos de hidrógeno**

El pasado 1 de junio finalizó con éxito en Stuttgart el F-Cell World Drive, la vuelta al mundo que han dado tres Mercedes-Benz Clase B F-Cell, pasando por cuatro continentes y 14 países (entre ellos España). Es la primera vez que se realiza una vuelta al mundo con vehículos eléctricos de pila de combustible de hidrógeno. El viaje duró 125 días en total, para conmemorar el 125 aniversario del nacimiento oficial del automóvil.
En los 70 días de conducción, cada uno de los Clase B eléctrico a hidrógeno ha hecho más de 30.000 km sin problemas mecánicos (aunque sí con un pequeño accidente en Kazajstán que involucró a uno de los protagonistas). Los tres coches no viajaron solos, partieron a finales de enero en una caravana de vehículos Mercedes, entre los que se encontraba una Sprinter que se encargaba del repostaje de hidrógeno, allí donde no había hidrogeneras disponibles.
http://www.motorpasionfuturo.com/coches-electricos/mercedes-benz-ya-ha-completado-la-vuelta-al-mundo-con-su-modelo-de-hidrogeno

- **Montacargas de celdas de combustible**

http://www.airproducts.com/industries/Energy/Hydrogen-Energy/Material-Handling.aspx

- **BMW desarrolla una nueva generación de depósitos de hidrógeno más ligeros y compactos.**

BMW Group Forschung und Technik, encargada de investigación y tecnología en la compañía, ha estado trabajando con otros fabricantes de automóviles para dar un importante paso adelante en el almacenamiento de hidrógeno. Trabajando en equipo con sus socios, que incluyen compañías de la industria aeroespacial europea, los ingenieros han desarrollado un nuevo tipo de depósito, hecho de un material compuesto, para almacenar hidrógeno líquido.
Por su innovadora concepción, el peso del sistema completo del depósito puede ser reducido a la tercera parte del de un depósito convencional cilíndrico de acero. Su forma adaptable proporciona grandes posibilidades en su diseño, lo que supone un significativo ahorro de energía. Además, los sistemas asociados están integrados dentro de la cubierta del depósito, lo que significa que el depósito ocupa menos espacio en el coche y que puede hacerse el mantenimiento con mucha mayor facilidad. El depósito interno está diseñado de forma modular, lo que simplifica el proceso de fabricación en comparación con los depósitos de hidrógeno existentes actualmente. Supone un llenado de 10Kg de hidrógeno, lo que podría proporcionar una autonomía bien por encima de los 500Km en un futuro vehículo.
http://www.biodisol.com/biocombustibles/bmw-nueva-generacion-de-depositos-de-hidrogeno-ligeros-y-mas-compactos-energias-alternativas-biocombustibles-hidrogeno/

- **La propuesta más reciente de BMW, el Hydrogen 7**

El primer automóvil de hidrógeno de lujo que prácticamente no tiene emisiones contaminantes y es apropiado para el uso diario, pero sobretodo con la ventaja de contar con un motor de combustión bimodo de doce cilindros, que funciona tanto con hidrógeno como con gasolina convencional, convirtiéndose en un automóvil que puede funcionar sin estar pendiente del poder repostar hidrogeno en caso de falta de suministradores de este combustible.

Con motor, chasis y carrocería basados en los sedanes BMW 760i, el Hydrogen 7 incorpora un motor de 260 caballos de potencia, con el que es capaz de acelerar en 9,5 segundos de 0 a 100 km/h, y alcanzar una velocidad punta de 230 km/h, limitada electrónicamente. Indicadores que demuestran que este combustible no merma el desempeño de vehículos de altas prestaciones.
http://www.mecanicavirtual.org/motores-hidrogeno.htm

c. Hidrógeno sólido

- **Almacenamiento de hidrógeno en grafito**

Físicos alemanes han propuesto una nueva vía de almacenamiento de hidrógeno utilizando grafito. El método se basa en almacenar el hidrógeno entre diferentes capas de grafito de escasos nanómetros de grosor. Como ventaja estaría el bajo coste de este material a diferencia de nanotubos de carbono y sistemas similares basados en carbono, cuyo alto precio es un serio inconveniente a la hora de implementarlos como almacenamiento de hidrógeno para células de combustible.
Se viene planteando desde hace tiempo la utilización del hidrógeno como combustible para medios de transporte. La idea es extraer el hidrógeno del agua (no hay fuentes de hidrógeno puro en nuestro planeta) mediante electrolisis usando energía eléctrica (de origen solar o nuclear) para así usar el hidrógeno en células de combustible. Dentro de estas células, ya plenamente desarrolladas, se combina el hidrógeno con oxígeno atmosférico para producir electricidad con la que mover un motor eléctrico.
http://neofronteras.com/?p=40

- **Plumas de pollo para los depósitos de hidrógeno**

http://www.biocarburante.com/plumas-de-pollo-para-los-depositos-de-hidrogeno/

- **Ingenieros daneses han puesto a punto una nueva tecnología capaz de dar a los vehículos de hidrógeno la misma autonomía de la que disfrutan los coches de gasolina.**

Se trata de una especie de píldora o comprimido que almacena hidrógeno sólido y que puede ser trasladado con seguridad y consumido a discreción. Se recarga empapando de nuevo con amoniaco su superficie. Con esta tecnología un vehículo podría recorrer 600 kilómetros con un depósito de hidrógeno equivalente a uno de gasolina.
http://www.tendencias21.net/Ingenieros-daneses-inventan-la-pildora-de-hidrogeno_a751.html

- **Horizon Fuel Cell Technologies desarrolla un motor de hidrógeno para mini vehículos ecológicos.**

Con unos centilitros de simple H_2O (agua) y algo de electricidad, el hidrógeno puede ser generado por medio de electrólisis y almacenado en estado sólido.
http://www.clipset.net/coche-radio-control-hidrogeno/

- **Un grupo de investigadores del NIST, la University of Maryland y el California Institute of Technology que estudian los MOFs (metal-organic framework).**

Este es un tipo de material cuyos poros tienen un tamaño del orden de un nanómetro que puede almacenar y liberar hidrógeno bajo ciertas condiciones.
http://www.migui.com/ciencias/tecnologia/nuevos-avances-en-el-uso-de-hidrogeno-como-combustible-del-futuro.html

- **Nuevo proyecto permite almacenar energía en la carrocería del vehículo**

Proyecto desarrollado en Londres por Emile Greenhalgh en el cual el vehículo puede almacenar energía extra en el techo, el capó y en la puerta del maletero pues están hechos de un compuesto reforzado con fibra de carbono unidas mediante una resina que además está entrelazada con iones de litio haciendo este compuesto en un conductor de electrodos.
http://mysoftt.blogspot.com/2011/06/nuevo-compuesto-permite-almacenar.html

4.2.2. Baterías

4.2.2.1. Introducción

Antes de comenzar habría que diferenciar términos, en español, pila se denomina a los generadores de electricidad basados en procesos químicos normalmente no repetibles o acumuladores de energía eléctrica no recargables; mientras que batería se aplica generalmente a los dispositivos electroquímicos semi-reversibles o acumuladores de energía eléctrica que sí se pueden recargar. Tanto uno como otro son términos provenientes de los primeros tiempos de la electricidad en los que se juntaban varios elementos o celdas, en el caso de las pilas se colocan uno encima de otro ‘’apilados” y en el caso de las baterías adosados lateralmente, consiguiendo así aumentar la magnitud de los fenómenos eléctricos y poder estudiarlos sistemáticamente.

4.2.2.2. Celda electroquímica

Es un dispositivo capaz de obtener energía eléctrica a partir de reacciones químicas, o bien, de producir reacciones químicas a través de la introducción de energía eléctrica.
Hay dos tipos fundamentales de celdas y en ambas tienen lugar una reacción redox y la conversión o transformación de un tipo de energía en otra.

- **Celda voltaica (o pila voltaica o celda galvánica o pila galvánica)**

Transforma una reacción química espontánea en una corriente eléctrica.

- **Celda electrolítica**

Transforma una corriente eléctrica en una reacción química de oxidación-reducción que no tiene lugar de modo espontáneo, en muchas de estas reacciones se descompone una sustancia química por lo que dicho proceso recibe el nombre de electrólisis. A diferencia de la celda voltaica los dos electrodos no necesitan estar separados por lo que hay un recipiente en el que tiene lugar las dos semirreacciones.
Semirreacciones: pérdida de electrones (oxidación) en el ánodo y ganancia de electrones (reducción) en el cátodo.

4.2.2.2.1. Celda voltaica (o pila voltaica o celda galvánica o pila galvánica)

Dentro de este tipo de celdas se pueden clasificar en:

- **Celdas galvánicas primarias**

Transforma energía química en eléctrica de manera irreversible.

- **Celdas galvánicas secundarias**

Pueden ser recargadas, es decir, que pueden revertir sus reacciones químicas mediante el suministro de energía eléctrica a la celda, hasta el restablecimiento de su composición original.

- **Baterías de flujo.**

Batería recargable en el cual el electrolito contiene uno o más especies de electroactivos disueltos que fluyen a través de una célula electro-química que convierte la energía química en electricidad.

- **Pilas de combustibles.**

Dispositivo electroquímico de conversión de energía que transforma la energía química directamente en energía eléctrica en la que un combustible y un oxidante sufren reacciones de transferencia de electrones de ánodo y el cátodo de una celda electroquímica de operación, separados respectivamente por una membrana de intercambio iónico.

4.2.2.2.1.1. Celdas primarias

Transforma energía química en eléctrica de manera irreversible.

a. Pila seca (Lechanché)

El electrolito es una pasta consistente en una mezcla de cloruro de amonio y cloruro de zinc. El electrodo negativo es de zinc, igual que la parte exterior de la pila, y el electrodo positivo es una varilla de carbono rodeada por una mezcla de carbono y dióxido de manganeso. Esta pila produce una fuerza electromotriz de unos 1,5 V. Ambas pilas son útiles para servicio intermitente, como en timbres eléctricos, y la pila seca, ha permitido la construcción de lámparas portátiles. No pueden usarse continuamente.

b. Pilas botón

b.1 Hg óxido de Zn o Batería de Hg

El electrodo negativo es de zinc, el electrodo positivo de óxido de mercurio y el electrolito es una disolución de cloruro de amonio. El anión cloro se desplaza hacia el zinc, y cuando la pila está en funcionamiento, se une con él para formar cloruro de zinc. El catión amonio tiende a reaccionar con el agua, en el electrodo de carbón, formando hidróxido amónico y liberando un catión hidrógeno de acuerdo con la relación. La batería de mercurio produce unos 1,34 V. Se utiliza en audífonos, células fotoeléctricas y relojes de pulsera eléctricos. Ha sido largamente usada para el uso en pilas "botón.

b.2 Ag óxido de Zn

Esta pila exhibe un cátodo de óxido de plata y un ánodo de polvo de zinc. Debido a que puede relativamente soportar altas cargas y tiene una casi constante, 1.5 volts de producción, este tipo de pila también es usado frecuentemente en relojes etc... También podemos encontrarla en algunos torpedos de uso militar, debido a su gran fiabilidad y capacidad. Aunque son caras, estas pilas son usadas cuando la densidad energética, el tamaño, y el peso son fundamentales.

c. Pila de Litio

El área de investigación de las pilas que ha atraído más la investigación en los últimos años ha sido el área de las pilas con un ánodo de litio. Debido a su alta actividad química se deben usar electrolitos no acuosos como por ejemplo sales cristalinas. Se han hecho pilas que no tienen separación alguna entre el ánodo y el cátodo líquido, algo imposible con pilas de sistema acuoso. Una capa protectora se forma automáticamente en el litio, pero esta se rompe en la descarga permitiendo voltajes cercanos a los 3.6 volts. Esto permite una gran densidad energética. Sus usos varían desde la aeronáutica, marcapasos a cámaras automáticas.

c.1. Pila de sulfuro de Li/Fe

Estas pilas en porte miniatura ofrecen grandes capacidades y bajo costo. En operaciones que requieren de 1.5 a 1.8 volts, estas pueden ser un substituto a algunos tipos de pilas alcalinas.

c.2. Li-Mn

Poco a poco van ganando aceptación. Tienen un voltaje de 2.8 volts, una alta densidad energética y un costo bajo dentro de las pilas de litio.

c.3. Monofluoruro Li-C

Estas han sido una de las pilas de litios más comercialmente exitosas, de larga vida, alta densidad energética, buena adaptación a temperaturas y con un voltaje de 3.2 volts. Sin embargo, el costo de mono fluoruro de carbono es alto.

c.4. Li-Thionyl

Este tipo de pila provee la más alta densidad energética disponible comercialmente. El cloruro de thionyl no sirve solo como un solvente del electrolito sino que también como material del cátodo. Su funcionamiento es impresionante, opera en un rango de temperaturas muy amplio, desde temperatura ambienta hasta temperaturas cercanos al cero absoluto. Se destina principalmente a equipos militares y vehículos aeroespaciales.

c.5. Dióxido Li-Sulfuro

Este tipo de pila ha sido extensivamente usado en los sistemas de energía de emergencia de muchos aviones entre otros usos. El cátodo consiste en un gas bajo presión con otro químico como electrodo salino; muy parecido al funcionamiento del sistema anterior. Este sistema funciona increíblemente bien, observado que en ciertas ocasiones tras su empleo en frío libera gases tóxicos tales como dióxido de sulfuro.

d. Aire despolarizado

Una manera muy práctica de obtener alta densidad energética es usar el oxígeno en el aire como "liquido" del material del cátodo. Si es combinado con un ánodo tal como el zinc, se puede obtener una mayor extension de vida a menor coste. La pila, eso sí, debe ser construida de manera tal de que el oxígeno no entre en contacto con el ánodo, el cual atacaría.

d.1. Zn-Aire

El diseño y principio de estas pilas es relativamente simple, pero su construcción no lo es, ya que el electrodo de aire debe ser extremadamente delgado. Se han hecho muchos estudios y grandes avances en el sellado del aire y la optimización de este tipo de pilas.

d.2. Al-Aire

Estas no han tenido una gran aceptación comercial, pero su pequeñísimo peso y su gran densidad energética potencial han hecho que grandes estudios se hayan llevado a cabo en esta área, tales como prolongar la vida de esta pila entre otros. Si estos problemas son resueltos podríamos ver grandes aplicaciones para este tipo de pilas en el futuro, incluidos su uso en autos eléctricos o incluso camiones.

e. Zn-Hg o sulfato Hg (1.434volts)

f. Cd-Hg (1.019 volts)

g. Cloruro de Mg-Ag o cloruro de Mn-Pb

Se ocupan en las operaciones submarinas donde el electrolito es el agua salina en el cual se encuentran sumergidas las pilas.

4.2.2.2.1.2. Celdas secundarias

Pueden ser recargadas, es decir, que pueden revertir sus reacciones químicas mediante el suministro de energía eléctrica a la celda, hasta el restablecimiento de su composición original.

a. Ácido-Pb (o de Planté)

Es la más utilizada en la actualidad. Normalmente es una batería que consta de tres a seis pilas conectadas en serie. Se usa en automóviles, camiones, aviones y otros vehículos. Es suficiente para arrancar un motor sin embargo, se agota rápidamente. El electrólito es una disolución diluida de ácido sulfúrico, el electrodo negativo es de plomo y el electrodo positivo de dióxido de plomo. Una batería de plomo y ácido tiene una vida útil de unos cuatro años. Produce unos 2 V por pila. Recientemente, se han desarrollado baterías de plomo para aplicaciones especiales con una vida útil de 50 a 70 años.

a.1. Tipo de placa

a.1.1. Placas planas empastadas

La placa plana empastada, la cual puede tener distintos espesores, esta formada por: una rejilla plana de aleación de plomo la que sirve de conductor de la corriente que entra y sale de la placa y de soporte mecánico

del material activo y por el propio material activo que es el que reacciona con el electrólito para dar como resultado corriente eléctrica. Esta placa puede ser de distintas superficies y espesores lo que definirá su capacidad que estará relacionada con el volumen, densidad y composición del material activo presente en la misma.

a.1.2. Placas tubulares

La placa tubular está formada por una rejilla en forma de peine que sirve como conductor de la corriente eléctrica, un tubo que contiene el material activo y el propio material activo. Estas baterías tienen la particularidad de soportar gran cantidad de ciclos profundos debido a que por su construcción el material activo no puede desprenderse de la rejilla. La pasta debe ser también preparada para este ciclado profundo, al igual que en las placas planas el espesor de las rejillas definirá la vida de las placas en condiciones de flote. Se utilizan aleaciones de alto contenido de antimonio por lo que estas baterías no son de libre mantenimiento. Su uso más frecuente es en auto-elevadores eléctricos, energía solar y eólica. Los diseños varían según se utilicen placas tubulares de perfil cuadrado, se logra una mayor superficie específica por lo que se tendrá la misma capacidad en menor volumen. Estas baterías son óptimas para aquellas aplicaciones de gran cantidad de ciclos (1 diario) de corriente moderada, donde se le ocasiona a la batería un ciclo de descarga profunda.

a.1.3. Placas Planté

La placa planté está fabricada con una placa plana de plomo sobre la que se forman los óxidos como consecuencia de un proceso electroquímico de formación. Son generalmente placas de varios mm de espesor y soportan una cantidad de ciclos intermedia entre la batería de placa plana y la de tipo tubular. Es un tipo de placa para descargas lentas por tiempos de entre 5 y 10 horas. Generalmente son baterías pesadas y de volumen considerable, siendo su costo elevado.

- Existen dos tipos de placas Planté: tipo Gould y tipo Exide Manchester.

  - En el tipo Gould, se parte de una placa lisa de plomo que se somete a un proceso de ranurado con el que se obtienen películas finas con un núcleo interno de plomo macizo, y la placa se coloca entonces en una solución oxidante y se carga. Este proceso hace que se forme el peróxido de plomo activo sobre los nervios, que se distingue por el material oscuro que queda entre ellos.

  - En el tipo Exide Manchester, seconstruye sobre emparrillado de plomo y antimonio. El material activo consiste en cintas acanaladas de plomo, arrolladas en especial e introducidas a presión en las perforaciones de la parrilla. El peróxido tiene un volumen muy superior al plomo del cual procede. Por tanto, cuando el acumulador está cargado, dichas especiales se expansionan, con lo cual quedan aún más fijadas a la placa.

a.2. Tipo de aleación

a.2.1. Aleaciones de Pb-Sb (EERR)

Es una de las más antiguas dentro de la fabricación de baterías. El porcentaje de Antimonio puede variar para distintos usos, estando entre el 10 al 2.5 %. A medida que el Antimonio se acerca a valores del 10 % se aumenta la posibilidad de ciclado de la batería, pero también aumenta la gasificación y el consumo de agua. Este tipo de baterías son de alta resistencia interna y alta corriente de flote, la cual aumenta a medida que envejece la batería, debido al envenenamiento que se va produciendo en la placa negativa, producido por la migración del ion Antimonio desde la placa positiva. No es factible fabricar baterías de libre mantenimiento y mucho menos sellada con este tipo de aleación y su uso es recomendado únicamente a baterías de ciclado profundo, como pueden ser: ***para auto-elevadores, energía solar y eólica.***

a.2.2. Aleaciones de Pb-Se

Es una aleación de Plomo-Antimonio entre el 1 y 2 %. En este tipo de aleación, la única función que cumple el Selenio es lograr que la baja cantidad de Antimonio presente en la aleación se encuentre de manera uniforme, cosa que no sería viable sin su aporte, y traería como consecuencia una rejilla quebradiza y sin las propiedades físicas y eléctricas necesarias.
Las baterías fabricadas con este tipo de aleación tienen menor gasificación que una fabricada con alto contenido de Antimonio, y soportan menos ciclados. Existe gran confusión sobre si las baterías de Plomo-Selenio son de libre mantenimiento o no. La respuesta es "depende".
Si la batería de Plomo-Selenio se utiliza en un automóvil, en donde la batería recibe la carga de un alternador 2 ó 3 horas al día, entonces, esta batería se comportaría como una batería de libre mantenimiento ya que no requerirá agregado de agua. Se puede decir que en un uso automotriz promedio, la batería de Plomo-Selenio es una batería de libre mantenimiento. Cuando esa misma batería es aplicada a un uso estacionario como puede ser, iluminación de emergencia, alarma, UPS u otras aplicaciones en donde la batería recibe corriente de mantenimiento de carga durante las 24 hs del día, este tipo de batería pasa a ser de bajo mantenimiento quedando como única alternativa de libre mantenimiento la batería de Plomo-Calcio.

a.2.3. Aleaciones de Pb-Ca

En este tipo de aleación no existe la presencia de Antimonio, el cual es suplantado por una proporción mucho de Calcio, dándole a la placa las mismas propiedades mecánicas. Esta aleación es óptima para baterías que estarán funcionando como sistemas de emergencias, en donde la mayor parte del tiempo se encuentran en una condición de carga de flote con auto-descarga más baja que cualquier otra aleación, por lo que la corriente de flote por cada 100 Ah de capacidad, en 8 horas se mantiene en valores de unos pocos miliamperios, reduciendo la gasificación a valores despreciables. Además, al no haber presencia de Antimonio en la batería, no se produce el envenenamiento de la placa negativa a lo largo de su vida, por lo que la resistencia interna y la corriente de flote permanece invariable durante toda la vida útil de la batería.
Estas propiedades de la aleación de Plomo-Calcio son las que la hacen imprescindibles para la fabricación de baterías selladas de gel o electrolito absorbido, ya que cualquier aleación con una mínima presencia de Antimonio provocará, durante su vida útil, un progresivo aumento de la gasificación deteriorando las relaciones estequiométricas necesarias para la recombinación gaseosa que debe llevarse a cabo en el interior de la batería, con la consecuente pérdida de capacidad y expectativa de vida de la misma.

a.3 Tipo mantenimiento

a.3.1 Bajo mantenimiento

Si es de Pb/Se. Son aquellas que requieren alguna reposición de agua desmineralizada para mantener el nivel del Electrolito, de tal manera que siempre esté por encima (unos 5mm) de la parte superior de las placas.

a.3.2 Libre mantenimiento

Si es de Pb/Ca. Batería sin mantenimiento es el nombre genérico dado a la batería producida con una tecnología que reduce significativamente el consumo interno de agua, durante el uso en condiciones normales (tensión entre 13.8V y 14.8V con el vehículo en funcionamiento), y que debe estar por debajo de un valor predeterminado. Las rejillas de las placas de estas baterías están constituidas por una aleación de Plomo-Calcio, Plomo-Plata o Plomo-Estaño.

Es importante saber que todas las baterías de solución líquida poseen un consumo de agua y, ese consumo dependerá directamente de la tecnología usada en su fabricación y del diseño interno de la tapa y/o

tapones. Actualmente existen diversas normas que establecen límites máximos de consumo de agua para considerarlas sin mantenimiento. A su vez las terminales automotrices poseen sus exigencias según sus normativas internas.

a.3.3. Sin atención

Si es sellada.

a.4. Tipo electrolítico

a.4.1. Líquido

El Electrolito Líquido puede tener distintas densidades entre 1.215 gr.sp. y 1.300 gr.sp. El valor de densidad está definido por la conjunción de varios factores, pero uno de los más importantes es el volumen del contenedor. Dado que para una cantidad de material activo determinada hace falta una cantidad definida de ácido absoluto, en función del volumen total disponible para el electrolito, se definirá la densidad necesaria del mismo. Otros factores que entran en consideración son las temperaturas y el uso.

a.4.2. Gelificado

El Electrolito Gelificado es uno de los dos sistemas que existen para la fabricación de baterías selladas. Cabe destacar que una batería es sellada, no por el empleo del Electrolito Gelificado (el que permite se realice la recombinación gaseosa), sino por el uso de la aleación de Plomo-Calcio, que dado el bajo nivel de gasificación, permite que se pueda realizar dicha recombinación. El gel se logra a través de la mezcla del Electrolito con una Sílica amorfa dando como resultado un compuesto de la consistencia de un gel.

a.4.3. Absorbido

El *Electrolito Absorbido* es el otro sistema existente para la fabricación de las baterías selladas. Su principio de funcionamiento es idéntico al de una batería de Electrolito Líquido. La diferencia es que en este caso, el Electrolito está absorbido por el separador, el cual está compuesto por una fibra de vidrio microporosa que mantiene suspendido el electrolito, y permite la recombinación gaseosa. Esta absorción del Electrolito en el separador permite que la batería se instale en cualquier posición, sin que por ello se produzcan derrames (a veces, también se las denomina como baterías de Electrolito inmovilizado).

Dado que la cantidad de Electrolito es escasa, estas baterías no tienen tapones para reponer agua desmineralizada sino válvulas. Estas se colocan para evitar que el agua del Electrolito se evapore durante la última parte de la carga. Asimismo, todo el diseño interno está previsto para facilitar la recombinación de gases, evitando su pérdida. Otro nombre con el que suelen designarse estas baterías es por las siglas VRLA, o sea, batería de plomo-ácido regulada por una válvula, en inglés.

Las *baterías de Electrolito Absorbido* tienen innumerables ventajas: a la ya mencionada (instalación en cualquier posición) se agrega el bajo mantenimiento (no se debe reponer agua), el menor espacio en planta que ocupan y la posibilidad de instalarse junto a equipamiento electrónico de cualquier tipo por tener una muy baja liberación de gases.

Las *precauciones a tener en cuenta* se relacionan con la temperatura del ambiente (lo ideal es que esté comprendida entre 15 y 30ºC y con el cargador, que debe ser de tipo autorregulado, con tensión constante y corriente limitada.

Las *principales aplicaciones* son: centrales telefónicas fijas, celdas de telefonía celular, servicios auxiliares

en sub-estaciones transformadoras, UPS (Sistemas interrumpidos de energía), iluminación de emergencia, todas ellas de tipo estacionario y algunas de tracción eléctrica, como sillas de ruedas y carros de golf. En cuanto a qué es mejor, si el gel o el electrolito absorbido, se podría decir que ambas son igualmente buenas. En descargas rápidas de menos de 60 minutos, las baterías de electrolito absorbido son más eficientes, proveen mayor corriente para una misma capacidad nominal que una batería de gel.

a.5. Uso

a.5.1. Automotrices o de arranque

Destinadas al arranque de automotores. Tienen que ser capaces de descargar el máximo de corriente posible en un corto espacio de tiempo manteniendo un alto voltaje. Tienen que ser capaces de aguantar muchas descargas incluso con cambios fuertes de temperatura. El peso, el diseño y la forma son también características determinantes.
Esto puede lograrse con una gran área de superficie de electrodo, un pequeño espacio entre placas y unas conexiones "heavy-duty" (resistentes a duros servicios) entre celdas.

a.5.2. De tracción

Es una batería que ha sido diseñada para soportar un alto ciclado es decir, una gran secuencia de descargas, seguidas de las correspondientes recargas. Las baterías de tracción están sujetas a una constante y relativamente pequeña descarga, durante largos periodos de tiempo, lo que supone un alto grado de descarga. Hay que procurar recargarlas, preferiblemente de 8 a 16 horas cada día antes de que se vuelvan a descargar. Se utilizan para entregar energía utilizada directamente para con la finalidad de generar movimiento en un equipo, como ser un autoelevador eléctrico, una locomotora de minas, un carro de golf, etc. Las baterías de tracción tienen electrodos muy gruesos con rejillas pesadas y un exceso de material activo.

a.5.3. Estacionarias

Para usos en comunicaciones, señalamientos, alarmas, iluminación, accionamiento, etc. Las baterías estacionarias están constantemente siendo cargadas y se debe tener cuidado de evitar que se sequen. Se mantienen permanentemente cargadas mediante un rectificador auto-regulado. Este rectificador puede, también, alimentar a un consumo, como en el caso de las centrales telefónicas, o a otro equipo de conversión de energía, como en el caso de las UPS. En los sistemas de iluminación de emergencia, en cambio, el rectificador sólo alimenta a la batería. En cualquier caso, lo importante es que la batería se descarga con muy poca frecuencia y el rectificador debe recargarla, luego de una descarga, y mantenerla perfectamente cargada, compensando la auto-descarga interna. El Electrolito y el material de la rejilla del electrodo están diseñados de forma que se minimice la corrosión.

a.5.4 UPS

Para altas corrientes instantáneas o descargas menores de 60 minutos. Es una fuente de suministro eléctrico que posee una batería con el fin de seguir dando energía a un dispositivo en el caso de interrupción eléctrica. Los UPS (uninterruptible power supply) se llaman en español SAI (sistema de alimentación ininterrumpida).

a.5.5 Energía solar y eólica

Almacenan energía eléctrica como resultado de la transformación de la energía solar o eólica.
Las pilas solares producen electricidad por un proceso de conversión fotoeléctrica. La fuente de electricidad es una sustancia semiconductora fotosensible, como un cristal de silicio al que se le han añadido impurezas.

Cuando la luz incide contra el cristal, los electrones se liberan de la superficie de éste y se dirigen a la superficie opuesta. Allí se recogen como corriente eléctrica. Las pilas solares tienen una vida muy larga y se utilizan sobre todo en los aviones como fuente de electricidad para el equipo de a bordo.

b. Alcalinas

b.1. Ni-Cd

Estas son las pilas portátiles más comunes que existen. Tienen la característica de poder dar corrientes excepcionalmente altas, pueden ser rápidamente cargadas cientos de veces, son tolerantes al abuso de sobrecarga. Sin embargo, comparadas con otros tipos de pila primarias e incluso con otras de su tipo, estas pilas son pesadas y tienen una limitada densidad energética. Estas pilas funcionan mejor si se permite la descarga completa antes de cargarse nuevamente, sino puede producirse un fenómeno conocido como el efecto de la memoria donde las celdas se comportan como si estas tuvieran menos capacidad para la cual fueron diseñadas. Su uso es muy variado, podemos encontrarlas desde los sistemas de partida para los motores de un avión. Este tipo de pila se comporta bien bajo temperaturas frías. Produce 1,15 V y su vida útil es de unos 25 años.

Contienen cadmio, un metal pesado que representa un peligro ecológico. Exteriormente tienen la misma forma y tamaño de las pilas. Interiormente poseen dos electrodos, el de cadmio (negativo) y el de hidróxido de níquel (positivo), separados entre sí por un electrolito de hidróxido de potasa. Llevan también un separador situado entre el electrodo positivo y la envoltura exterior y un aislante que las cierra herméticamente.

b.2. Ni-Fe

Ideada por el inventor estadounidense Thomas Edison en torno a 1900. El principio de funcionamiento es el mismo que en la pila de ácido y plomo, pero aquí el electrodo negativo es de hierro, el electrodo positivo de óxido de níquel y el electrolito es una disolución de hidróxido de potasio. La pila de níquel y hierro tiene la desventaja de desprender gas hidrógeno durante la carga. Esta batería se usa principalmente en la industria pesada. La batería de Edison tiene una vida útil de unos diez años y produce aproximadamente unos 1,15 V. Este tipo de pilas puede proveer miles de ciclos, pero no al recargar necesitan mucha energía y al funcionar se calientan más de lo deseado.

b.3. Ni-Zn

Están bajo investigación y si su vida útil puede ser prolongada, podrían ser un viable sustituto para las pilas de níquel-cadmio.

b.4. Ni-H

Estas pilas fueron desarrolladas principalmente para el programa espacial de los EE.UU. Los estudios demuestran que aleaciones de níquel pueden reversiblemente disolver o soltar hidrógeno de forma proporcional a los cambios en la presión y temperatura. Este hidrógeno serviría como un material de ánodo. Hay especulación de que este tipo de pila podría reemplazar a la de níquel-cadmio en algunas aplicaciones.

b.5 Dióxido de Zn-Mn

Este tipo de pilas fueron diseñadas para actuar como substitutos en sistemas donde se requieran cantidades moderadas de energía. Su gran densidad energética y su bajo costo incitan a más estudios.

c. Li-IO (ion litio)

Este tipo de pila muestra una gran promesa a futuro ya que su energía teóricamente va de 600 a 2,000 vatios por hora por kg. Algunos elementos con los cuales se investiga son: disulfito de litio-titanio, dióxido de litio-manganeso y disulfito de litio-molibdeno. Y por su ausencia de efecto memoria.
Estas baterías tienen un gasto de producción elevado y muy costoso que se refleja en su precio final. Su ciclo de vida se sitúa entre los 500-600 ciclos de carga/descarga. Sin embargo ofrece una capacidad equivalente y más fiable dando una densidad de energía más elevada y constante que las baterías de Ni/Cd o Ni/MH.

d. Na-S

Mucha experimentación se ha llevado a cabo con este tipo de pila que funciona alrededor de los 350 ºC. Aún se deben resolver bastantes problemas relativos a su estabilidad. Especialmente cuando se toma en cuenta que necesita ser enfriada y calentada entre usos. Pero su economía y la entrega de 2.3 volts (alta densidad energética) hacen que este sistema sea extremadamente atractivo, especialmente en el área de los automóviles eléctricos. Necesitan aislamiento por la naturaleza corrosiva del sodio. Hay instalaciones existentes de hasta 48MW.

e. Alcohol

Presentado en la Power 2000 Conference en San Diego un prototipo de una micro batería apta para producir energía a partir del metanol. El funcionamiento consiste en la mezcla de oxígeno y metanol dentro de un envoltorio cerámico, que genera energía a la temperatura ambiente.
El objetivo es crear una batería pequeña y barata, con una autonomía muy superior a la de las baterías de Litio, y que en el futuro pueda por ejemplo alimentar un móvil durante un mes. Fue testada durante varias semanas sin que presentase señales de degradación relevantes.

4.2.2.2.1.3. Baterías de flujo

Las baterías de flujo son una forma de batería recargable en el cual el electrolito contiene uno o más especies de electroactivos disueltos que fluyen a través de una célula electro química que convierte la energía química en electricidad. Los electrolitos adicionales son almacenados externamente, generalmente en tanques, y por lo general se bombea a través de la celda del reactor. Pueden recargarse rápidamente mediante la sustitución del electrolito líquido, mientras simultáneamente se recupera el material gastado para la re-energización. En otras palabras, lo diferencia de las pilas de combustible que las especies químicas activas se almacenan dentro de la batería.

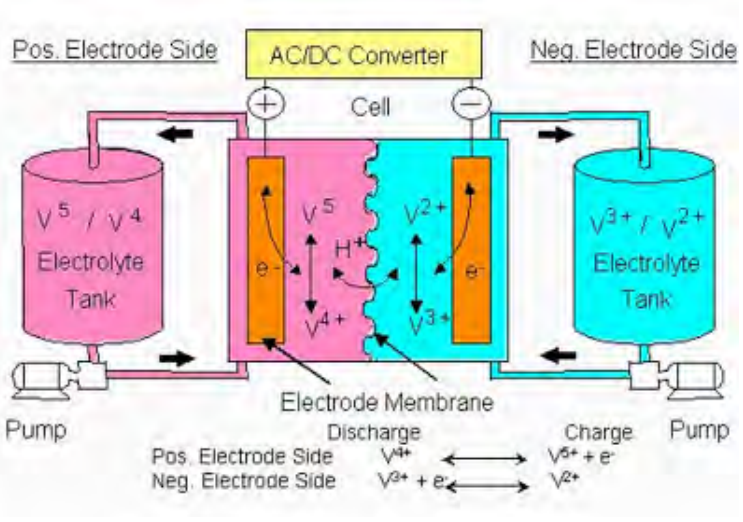


Figura 30: baterías de flujo.

La densidad de energía de una batería está limitada por la cantidad de material activo que puede almacenar en su interior. Los electrolitos (en general, la mayoría en el peso y en volumen) fluyen a través del reactor.

La principal diferencia con las pilas de combustible es que la reacción química es reversible por lo que se

puede recargar sin reemplazamiento del material electroactivo. Pero tampoco son pilas secundarias ya que el poder y la densidad de energía son independientes uno del otro.

Resumiendo tiene una capacidad ilimitada de almacenamiento depende del tamaño de los tanques. Permite muchas cargas y descargas.

Presentan un diseño flexible, ciclos de vida largos, tiempos de respuesta rápidos, no necesitan ''igualación'' de carga y no producen emisiones contaminantes. Algunos incluso necesitan bajo mantenimiento y tolerancia a la sobrecarga/descarga profunda. Por el contrario, son mucho más complicadas que las batería estándar ya que pueden requerir bombas, sensores. Y la densidad de energía es bastante baja con respecto a las de ion litio.

a. Batería d Flujo Redox (redox flow battery)

En las baterías de flujo redox todos los elementos electroactivos se disuelven en el electrolito. La energía de este tipo de batería de flujo se determina con plena independencia de la potencia de la batería porque la energía está relacionada con el volumen del electrolito (tamaño del tanque) y la potencia con el tamaño del reactor. Es decir, que el tiempo de descarga puede variar, según sea necesario, desde varios minutos hasta varios días.

b. Batería de Flujo Híbrido (hybrid flow battery).

En las baterías de flujo híbrido uno o más elementos electroactivos son depositados en una capa sólida del sistema. Es parecida a la batería convencional ya que es de limitada energía en relación con la cantidad de material sólido que se puede acomodar dentro del reactor. El tiempo de descarga varía desde varios minutos a unas horas.

c. Célula o Pila de Combustible Redox (redox fuel cell).

La pila de combustible redox realmente es un reactor de flujo convencional que sólo opera para producir electricidad (no está eléctricamente cargada). La recarga se produce con la reducción del electrolito negativo usando combustible (p.e. hidrógeno) y la oxidación del electrolito positivo utilizando un oxidante (oxígeno o aire).

d. Aplicaciones

	Voltaje máx. célula	Densidad media de potencia del electrodo	Densidad media de energía del fluido
Fe/Sn	0.62 v	200 W/m^2	
Fe/Ti	0.43 v	200 W/m^2	
Fe/Cr	1.07 v	200 W/m^2	
Va/Sulfato Va	1.4 v	800 W/m^2	25 Wh/kg
Va/Bromuro de Va		~ 800 W/m^2	50 Wh/kg
Na/polisulfuro de Br	1.54	~ 800 W/m^2	
Zn/Br	1.85	~ 1000 W/m^2	75 Wh/kg
Pb/ácido (metano sulfato)	1.82	~ 1000 W/m^2	
Zn/Ce (metano sulfato)	2.43	~ 1200-2500 W/m^2	

Tabla 10: información sobre voltaje y densidad de varios compuestos.

- Balanceo de carga, la batería se utiliza para almacenar durante la noche cuando la electricidad es barata y proporcionar electricidad cuando es más costosa.
- Almacenamiento de energía procedentes de fuentes renovables como la eólica o la solar.
- UPS, se utiliza la batería si la alimentación principal falla.
- Vehículos eléctricos, ya que pueden cargarse rápidamente mediante la sustitución de los electrolitos.

e. Costos.

- **Coste por ciclo y descarga**

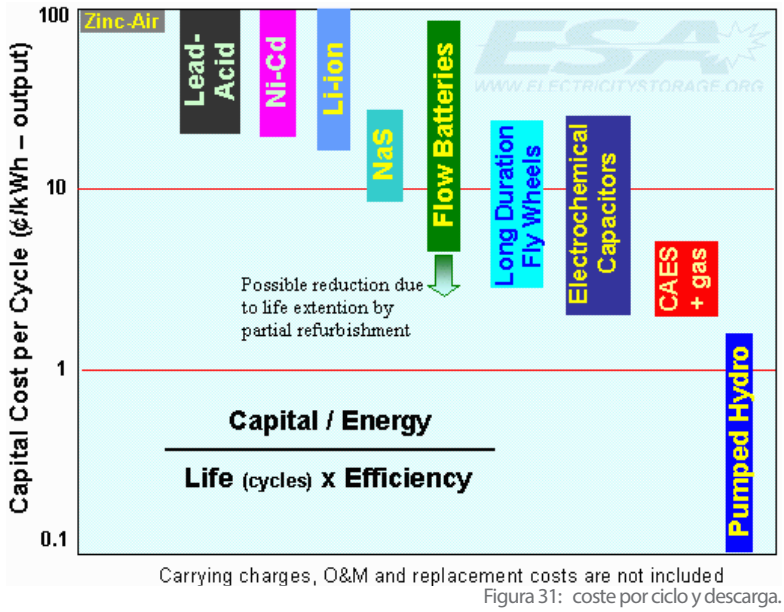


Figura 31: coste por ciclo y descarga.

- **Coste por potencia vs coste por energia**

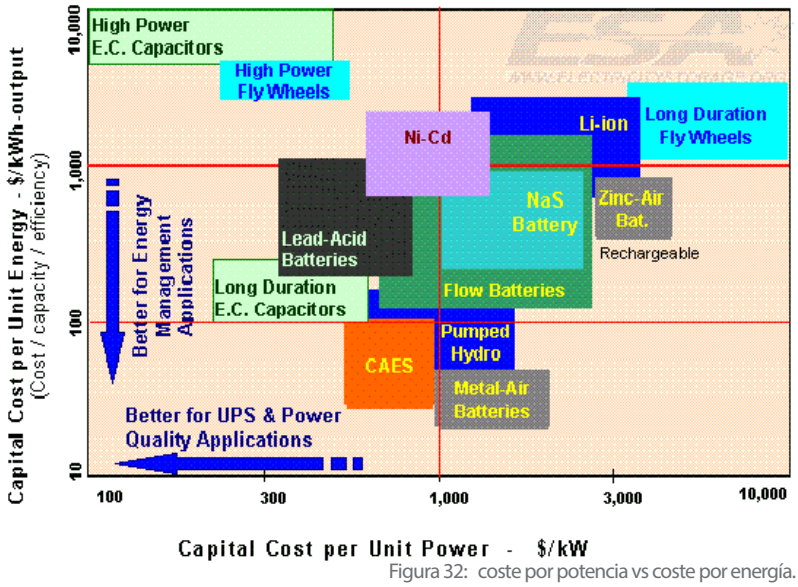


Figura 32: coste por potencia vs coste por energía.

- **Densidad energética**

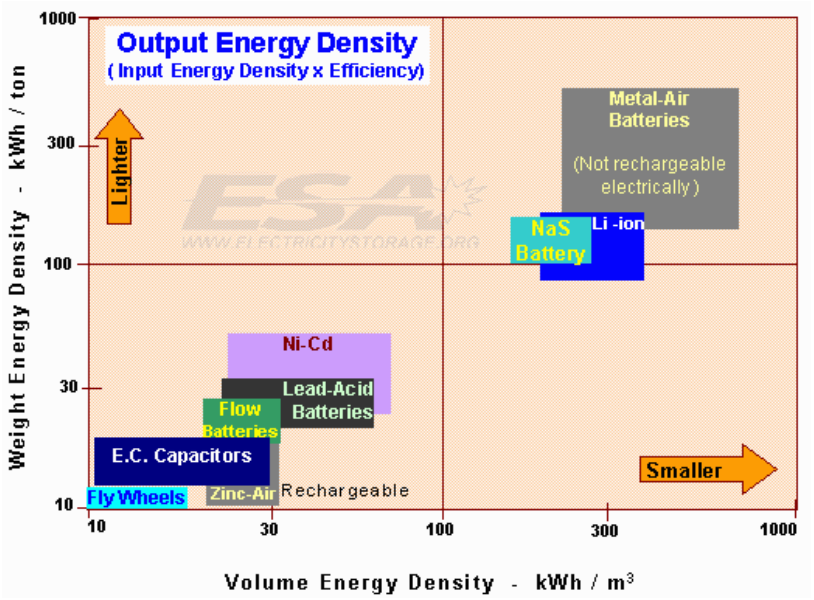


Figura 33: densidad energética.

- **Estado del arte**

	Batería habitual	Batería habitual	Duración habitual de descarga	Fase de desarrollo
Baterias (plomo-ácido, NiCd, NiMH, Li-ion)	kW - 500 kW	MWh - 100 MWh	1 h - 8 horas	Desarrollado/ Estandarizado
Volantes de inercia	500 kW - 1 MW	100 kWh - 100 mWh	< 5 minutos	Desarrollado/ Estandarizado
Hidrobombeo	100 MW - 4000 MW	500 MW - 15 GWh	4 - 12 horas	Desarrollado/ Estandarizado
CAES	25 MW - 3000 MW	200 MWh - 10 GV/h	1 - 20 horas	Desarrollado, primera generación demostrada
NaS	1 MW	1 MWh	1 horas	Terminada la etapa de demostración del proyecto, comercialmente disponible
SMES	10 kW - 10 MW	10 kWh - 1 MWh	1 - 3 minutos	Desarrollado, no desarrollado comercialmente aun
Supercondensadores	< 250 kW	10 kWh	< 1 minutos	Desarrollado
Baterías de flujo	100kW - 10 MW	1 - 100 MWh	10 horas	No desarrollado comercialmente aun
Almacenamiento de hidrógeno	10 MW	Sin limite	> 5 horas	En proceso de desarrollo

Tabla 11: Estado del arte de las baterías.

4.2.2.2.1.4. Pilas de combustible

Dispositivo electroquímico de conversión de energía que transforma la energía química directamente en energía eléctrica en la que un combustible y un oxidante sufren reacciones de transferencia de electrones de ánodo y cátodo de una celda electroquímica en operación, separados respectivamente por una membrana de intercambio iónico. Además no están sujetos a limitaciones de Carnot para los motores de calor e, idealmente, se puede generar electricidad siempre que se le suministre el combustible y un oxidante. Por tanto, en las pilas de combustible las especificaciones de potencia y energía pueden ser ampliadas de forma independiente mientras que en las baterías de flujo están limitadas por la cantidad de material activo que se puede almacenar en su interior.

El electrolito en una pila de combustible se mantiene en todo momento dentro del reactor (en forma de una membrana de intercambio iónico , por ejemplo). Lo que desemboca en el reactor son sólo los productos químicos electroactivos, que son no conductores (por ejemplo, hidrógeno, metanol, oxígeno, etc.). Esto está en contraste con una batería de flujo en la que al menos algunos de los electrolitos (en general, la mayoría en el peso y términos de volumen) fluyen a través del reactor.

En las pilas de combustible son posibles muchas combinaciones de combustibles y oxidantes. Por ejemplo, una pila de combustible de hidrógeno utiliza el hidrógeno como combustible y el oxígeno como oxidante. Otros combustibles son hidrocarburos y alcoholes. Otros oxidantes son el cloro y el dióxido de cloro.

En el ánodo un catalizador oxida el combustible, generalmente hidrógeno, convirtiendo el combustible en un ion cargado positivamente y un electrón con carga negativa. El electrolito es una sustancia diseñada específicamente para para que los iones pueden pasar a través de él, no pudiendo los electrones atravesarla. Los iones viajan a través del electrolito hacia el cátodo. Al llegar al cátodo, los iones se reúnen con los electrones y los dos reaccionan con una sustancia química en tercer lugar, por lo general de oxígeno, para crear el agua o el dióxido de carbono.

Para entregar la cantidad deseada de energía, las pilas de combustible pueden ser combinadas en circuitos en serie y en paralelo, en serie da rendimientos más altos de tensión, y en paralelo permite suministrar una mayor corriente.

Las celdas de combustible se clasifican según el tipo de medio conductor de la carga iónica (electrolito) dentro de la celda. También se pueden clasificar según la temperatura de trabajo a la que funcionen.

- **Precios**

Las pilas de combustible son equipos muy caros en comparación con las tecnologías maduras como los motores de combustión o las baterías convencionales. En el caso de los motores de combustión, que están en el orden de magnitud de 50-100€/kW, el coste de las pilas de combustible es entorno a los 6000€/kW.

No obstante, analizando el coste global de la disponibilidad de la energía, como es el caso típico de las carretillas elevadoras eléctricas, en las que, en los sitios en los que se usan a 3 turnos, se necesitan tres juegos de baterías (uno en uso, uno en carga, uno en enfriamiento), más los cargadores, más la ocupación de área en la nave, más los operarios dedicados al manejo de las baterías, más el hecho de que la batería pierde prestaciones a lo largo del turno. En este caso, la rentabilidad de usar pilas de combustible está ya muy cercana.

El coste tan elevado se debe en parte a los materiales utilizados (metales nobles como el platino o materiales de muy alta tecnología como las membranas), al precio de la investigación requerida recientemente (alta

tecnología), a las soluciones no optimizadas y, sobre todo, a que las pilas no se fabrican con medios de producción en serie. Todos los fabricantes trabajan sobre pedido, y la mayor parte de ellos montan las pilas manualmente. Los bajos volúmenes del mercado actual no justifican aun las inversiones en medios de ensamblaje.

- **Comparación de las tecnologías de pila de combustible**

Tipo pilas	Electrolito	Tª operación	Tamaño típico de pila	Eficiencia	Aplicaciones	Ventajas	Desventajas
PEM Membrana electrolito de polímero	Perfluoruro sulfhidrico	50 - 100 ºC 122 - 212 ºC Tipicamente a 80 ºC	<1 - 100kW	50% transporte 35% estaconario	· Copia de seguridad de energía · Potencia portátil · Generación distribuída · Transporte · Vehículos especiales	· El electrolito sólido reduce la corrosión · Baja temperatura · Rápida puesta en marcha	· Catalizadores costosos · Sensible a las impurezas de combustible · Residuos de calor a baja temperatura
AFC Alcalina	Matriz empapada en una solución acuosa de hidróxido de potasio	90 - 100 ºC	<10 - 100kW	60%	· Militares · Espacio	· Reacción catódica más rápida que en el alcalino lo que lleva un alto rendimiento · Componentes de bajo costo	· Sensible al CO_2 en el combustible y el aire · El electrolito de gestión
PAFC Ácido fosfórico	Matriz empapada en ácido	150 - 200 ºC	400kW 100kW	40%	· La generación distriuída	· Alta temperatura permite la congelación · Mayor tolerancia a las impurezas del combustible	· Catalizador Pt · Bajo consumo y energía
CFCM o MCFC Carbonato fundido	Matriz empapada en una solución de litio, sodio y/o carbonatos potásicos	600 - 700 ºC	300kW-3MW Módulo 300kW	45 - 50% de la utilidad eléctrica	· La generación distriuída	· Alta eficiencia · Flexibilidad de combustibles · Se puede utilizar variedad de catalizadores · Apto para la congelación	· Alta temperatura de corrosión o de descomposición de los componentes · Largo tiempo de inicio · Baja densidad de potencia
SOFC Óxido sólido	Zirconita estabilizada con itrio	700 - 1000 ºC	1kW-2MW	60%	· La alimentación auxiliar · Servicios eléctricos · Generación distribuída	· Alta eficiencia · Flexibilidad de combustibles · Variedad de catalizadores · Electrolito sólido · Apto para la congelación · Ciclo hibridos	· Alta temperatura de corrosión o de descomposición de los componentes · Alta temperatura de operación requiere largos tiemoos de arranque

Tabla 12: comparación de las tecnologías de pila de combustible.

4.2.2.3. Proyectos relacionados

4.2.2.3.1. Con energía eólica

- **Energía eólica y pilas de combustible**

Le necesidad de almacenamiento eléctrico deriva de la naturaleza intermitente y aleatoria del viento que se ha resuelto tradicionalmente con baterías y el apoyo de grupos electrógenos.
Pero este sistema presenta elevados costos y problemas técnicos que limitan el tamaño y capacidad de sistemas viables a potencias de menos de 10kW aproximadamente. El almacenamiento práctico con baterías

tiene una duración muy limitada mientras que la puesta en marcha de los grupos diesel convencionales presentan los habituales problemas de suministro de combustible, ruido, contaminación del aire y emisiones de carbono.

La combinación de almacenamiento de hidrógeno, con su producción por medio de un electrolizador y su conversión a electricidad mediante pilas de combustible es una de las tecnologías con más opciones de futuro, aplicable incluso a pequeña escala (sistemas aislados). Además a esto hay que añadir el abaratamiento y la mayor fiabilidad de la electrónica de potencia asociada, para la conversión de corriente continua a corriente alterna de red. En este tipo de sistemas hay que considerar tres equipos fundamentales: **los generadores eólicos, el electrolizador y la pila de combustible.**

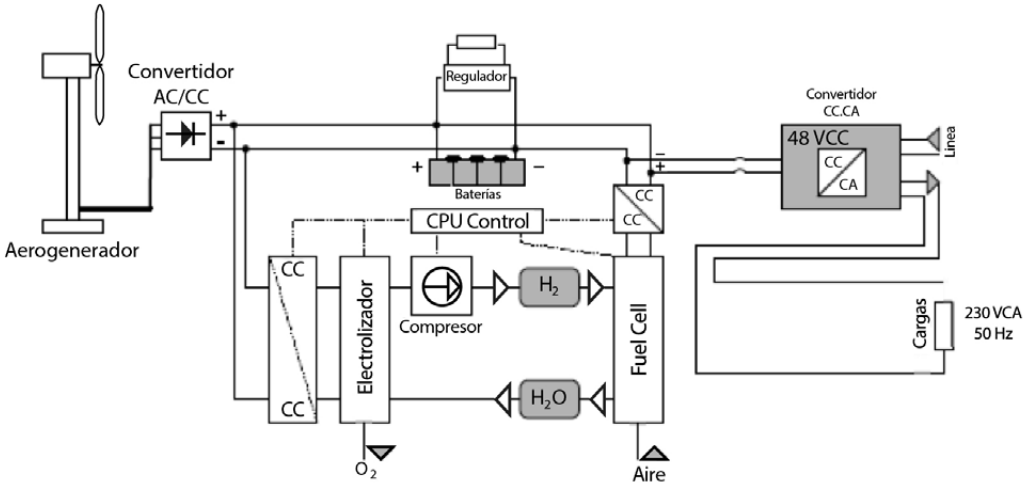


Figura 34: proceso de producción de hidrógeno a partir de energía eólica.

El exceso de potencia en momentos de fuerte viento, que se traduce en un aumento de la tensión de las baterías, se utiliza para alimentar el electrolizador. La mayoría de los electrolizadores de KOH (alcalinos) pueden conectarse a través de un convertidor CC/CC que permite optimizar la transferencia de potencia. Este electrolizador produce hidrógeno que es comprimido y almacenado en tanques a presión. Los reguladores de batería se ajustan a un nivel de tensión superior al de entrada del electrolizador, para que la electrónica del convertidor CC/CC que alimenta al electrolizador funcione correctamente.

En momentos de ausencia de energía eólica, el sistema de control determina la puesta en marcha de la celda de combustible. La celda es alimentada con hidrógeno proveniente del tanque de almacenamiento, reduciendo previamente su presión, ya que no se puede suministrar a la pila de hidrógeno a la elevada presión a la que está almacenado.

Los valores típicos de presión de almacenamiento del hidrógeno puede ser cercano a los 200 bar, mientras que la presión de alimentación de las pilas de combustible es únicamente unos poco milibares superior a la presión atmosférica de 1 bar.

En los instantes en lo que el recurso eólico es inexistente, se pone en funcionamiento la pila de combustible, que lleva adaptado otro convertidor CC/CC, cuya misión es por un lado hacer funcionar a la pila en su punto óptimo de rendimiento, y por otro adaptar los niveles de tensión de la pila, con la tensión existente en el bando de las baterías.

El agua producida en la pila de combustible como subproducto, puede ser condensada, para luego ser utilizada para alimentar al electrolizador, cerrándose de esta forma un ciclo de reutilización del agua.
Para poder llegar a controlar la operación del sistema completo es necesario la unidad central de procesamiento

de datos, en las que se registran las variables de operación en tiempo real, para que tome las decisiones de control del sistema a través de algoritmos de operación previamente programados.

- **Proyecto de estabilización de la red con inyección eólica mediante baterías de flujo en Futamata, Japón.**

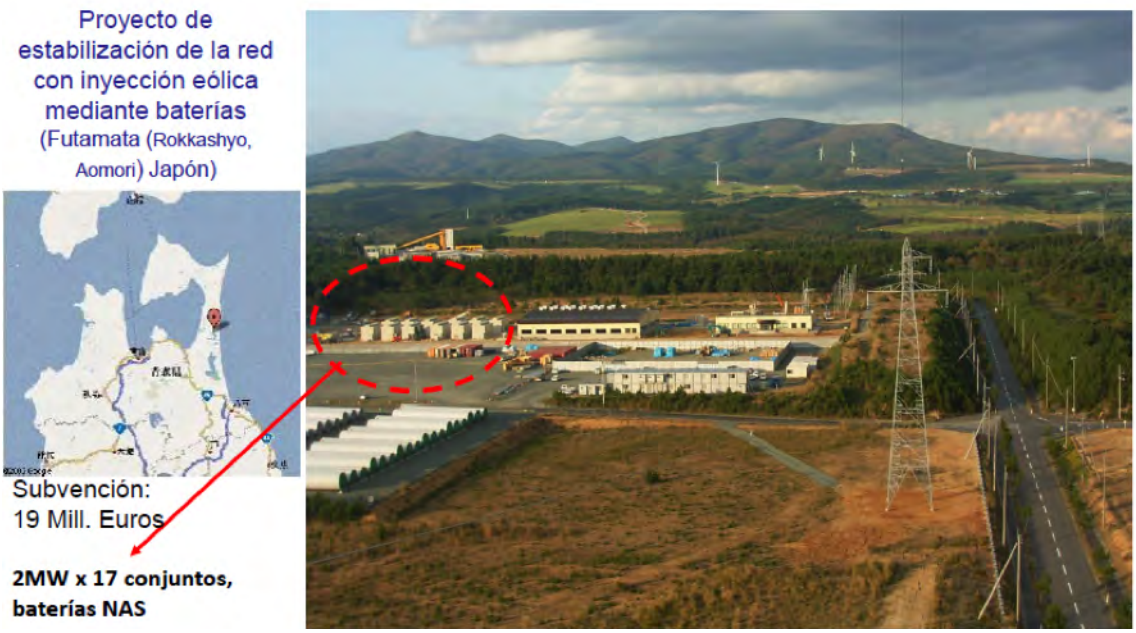


Figura 35: vista panorámica del campus de baterías.

- **Proyecto en España con batería de flujo**



Figura 36: aerogenerador Gamesa.

- Acciona ha creado un centro piloto para la producción de hidrógeno a partir de energía eólica. El centro piloto de El Perdón, producirá hidrógeno por electrólisis del agua.

- Gas Natural y la Xunta han promovido la primera planta europea de producción y almacenamiento de

hidrógeno de Europa, ubicada en el Parque Eólico de Sotavento, en Xermade (Lugo) y Monfero (La Coruña). La instalación se encuentra en el Parque Tecnológico de Boecillo VALLADOLID en operación desde el año 2005. Liderado por BESEL, ha contado con la colaboración de CARTIF, CIEMAT, CARBUROS METÁLICOS y ENERMAN.

- Proyecto Wind to Hydrogen WH2H (Corporación Tecnológica de Andalucía)Este tipo de instalaciones gestionará de forma más eficiente la energía eléctrica generada por parques eólicos pudiendo adaptar la curva de producción a la demanda del mercado, realizar una producción de energía constante, corregir desvíos respecto de la producción prevista por los sistemas de predicción, y optimizar económicamente la energía generada.

- Proyecto ITHER. Fundación del Hidrógeno de Aragón Instalación en el Parque Walqa de 635 kW eólicos en tres aerogeneradores con un electrolizador alcalino y otro PEM

- Proyecto RES2H2. Instituto Tecnológico de Canarias ITC. Producción de hidrógeno y agua potable. Aerogenerador V27-225 kW. Electrolizador de alta presión 40 kW 25 bar Tanque de 500 Nm^3

- Proyecto Nigh Wind(UE-FP7): Proyecto de investigación para el diseño de baterías de refrigeración que almacenan energía en periodos de alta generación y baja producción

- Proyecto REVE(Regulación eléctrica con vehículos eléctricos)

4.2.2.3.2. Otros

- **Instalación fotovoltaica sin conexión a red con baterías para almacenamiento de energía**

Las instalaciones de energía solar sin conexión a red con baterías para almacenamiento de energía son excelentes para producir electricidad en cualquier lugar, por remoto que sea, y a cualquier hora. Estas instalaciones son especialmente convenientes en áreas donde no hay red eléctrica o la conexión a la red es demasiado cara.



Figura 37: baterías.

La capacidad de almacenar la energía eléctrica fotovoltaica convierte a la energía solar en una fuente de electricidad fiable de día y de noche, con lluvia o sol. Las instalaciones de energía solar con almacenamiento en baterías se utilizan en todo el mundo para proporcionar la electricidad necesaria para luces, sensores, equipos de grabación, interruptores, electrodomésticos, teléfonos, televisiones y cualquier instrumento que funcione con electricidad.

Las instalaciones de energía solar con baterías funcionan conectando paneles fotovoltaicos a una o varias baterías, y las baterías, a su vez, al cableado eléctrico. Durante el día, los paneles fotovoltaicos cargan las baterías, y las baterías proveen de energía a la instalación eléctrica según se necesite. Un dispositivo eléctrico llamado regulador de la carga se encarga de que las baterías se carguen correctamente y ayuda a prolongar su vida protegiéndolas de cargas excesivas y de descargas completas.

- **Honda presenta el nuevo FCX Clarity, un avanzado vehículo de pila de combustible.**

  - **Honda FCX Clarity. Especificaciones principales**
    - *Número de pasajeros:* 4
    - *Motor Pot. salida máx.:* 100 kW

- *Par máximo:* 256 Nm
- *Tipo:* motor síncrono de CA (fabricado por Honda)
- *Pila de combustible Tipo:* PEFC (pila de membrana de intercambio protónico, fabricada por Honda)
- *Pot. de salida:* 100 kW
- *Combustible Tipo:* Hidrógeno comprimido
- *Almacenamiento:* Depósito de hidrógeno de alta presión
- *Capacidad del depósito:* 171 litros
- *Dimensiones (L x An x Al):* 4.835 x 1.845 x 1.470 mm
- *Peso:* 1625 kg
- *Vel. máx.:* 160 km/h
- *Almacenamiento de energía:* Batería de iones de litio

- **Cómo funciona el FCX Clarity**

El FCX Clarity utiliza la pila Honda V Flow en combinación con una nueva y compacta batería de iones de litio y un depósito de hidrógeno que impulsa el motor eléctrico del vehículo. La pila de combustible opera como principal fuente de potencia del vehículo. El hidrógeno se mezcla con oxígeno atmosférico en la pila de combustible, donde la energía que se genera con la reacción se convierte en potencia eléctrica para impulsar el vehículo. También se genera energía adicional al capturar la energía cinética que se obtiene del frenado y la aceleración (frenada regenerativa), la cual se almacena junto con la energía sobrante de la pila de combustible en la batería de iones de litio, y se utiliza para complementar la potencia de la pila de combustible cuando es necesario. El vehículo sólo emite vapor de agua.

http://www.autoglobal.com/noticias/9000/9172.html

- **Motor eléctrico con celdas de combustible**

El fabricante Toyota ha logrado la homologación en Japón de un vehículo híbrido alimentado por celda de combustible que logra una autonomía de 830 kilómetros, frente a los 330 de la generación anterior.

El nuevo vehículo, FCHV-adv (Fuel Cell Hybrid Vehicle-Advanced) ha sido homologado con la nueva celda de combustible, de nuevo diseño y alto rendimiento, que aún será mejorada en una nueva fase de desarrollo.

El Toyota FCHV-adv ha sido probado rodando tanto a altas temperaturas como a bajas, a partir de los resultados proporcionados por estas pruebas, Toyota ha perfeccionado el sistema de celda de combustible de este vehículo para mejorar la autonomía y el arranque a bajas temperaturas, que habían frenado hasta ahora el uso generalizado de los vehículos de celda de combustible.

http://www.mecanicavirtual.org/motores-hidrogeno.htm

- **Más de 5200 estaciones de combustible de hidrógeno estarán operativas en el 2020.**

Según un nuevo informe de Pike Research, como resultado de esta inversión en infraestructura, más de 5.200 estaciones de servicio de hidrógeno para coches, autobuses y carretillas elevadoras en todo el mundo será operativa en 2020, frente a sólo 200 estaciones en 2010. La inversión anual en estaciones de hidrógeno alcanzará los US $ 1,6 mil millones, con un acumulado de 10 años la inversión total ascenderá a US $ 8,4 mil millones. El aumento de la utilización del hidrógeno como combustible impulsará la demanda anual de aproximadamente 775.000 kilogramos (kg) en 2010 hasta 418 millones kg en 2020.

www.pikeresearch.com
www.fuelcellworks.com

- **Horizon MiniPAK: Cargador de gadgets portátil que emplea celdas de combustible de hidrógeno.**

El MiniPAK es el primer producto portátil basado en celdas de combustible de hidrógeno que compite en costo/beneficio con las clásicas pilas recargables y desechables.
Esta específicamente diseñado para pequeños dispositivos electrónicos de consumo, entregando hasta 1.5 a 2.5W (5V, 400mA) de potencia continua usando un puerto USB estándar (junto a una serie de conectores) y utilizando cartuchos combustible recargables con un máximo de 12Wh (vatios-hora) de energía. Aunque la capacidad de la Minipak se limita a dispositivos de pequeño tamaño, es una planta de energía a pequeña escala que produce electricidad a partir de hidrógeno.

http://www.solutekcolombia.com/horizon_minipak_cargador_de_gadgets_portatil_que_emplea_celdas_de_combustible_de_hidrogeno_solutek_mantenimiento.htm

- **Recarga tu móvil hablando**

Para lograrlo los investigadores están trabajando sobre un receptor con fibra de zinc que, al recibir el sonido lo transforman en energía eléctrica que conseguiría recargar la batería de los teléfonos.

http://www.muyinteresante.es/recarga-tu-movil-hablando

- **Airbus proyecta aviones ecológicos con pilas de combustible**

Airbus se encuentra desarrollando una tecnología de pilas de combustible para usarlas como fuente alternativa para suministrar energía eléctrica a los aviones, tanto en tierra como durante los vuelos, lo que contribuirá a construir aviones más ecológicos con una disminución efectiva de las emisiones.
http://noticias.comprarvuelosbaratos.com/2011/06/21/airbus-proyecta-aviones-mas-ecologicos-con-pilas-de-combustible/

- **Grandes tanques contenedores podrían brindar energía en 2000 hogares.**

Los investigadores de varios Institutos Fraunhofer están trabajando conjuntamente para desarrollar baterías líquido escalable con el objetivo de construir algún día una instalación de una batería del tamaño de una cancha de baloncesto con una capacidad de 20 MWh - la energía suficiente para suministrar electricidad a alrededor de 2.000 hogares a través de la noche de un invierno largo o un día nublado.
Estas enormes baterías serían provistas de energía obtenida de fuentes renovables como la solar y la eólica que pueden ayudar a salvar el planeta, y que todavía no pueden ser implementadas eficientemente debido al desafío todavía no resuelto del almacenamiento de la energía que se generan durante períodos de poco viento o días sin sol.
Por ello, un enfoque de sistemas de almacenamiento a gran escala de energía son las baterías de flujo redox, que son básicamente grandes tanques con electrolitos que fluyen.

http://www.qtecnologico.com/el-futuro-de-la-energia-renovable.html

4.2.2.4. Costos

Algunos datos del coste de las pilas de combustible aportados por el departamento de energía de Estados Unidos.

- **Coste proyectado del transporte de Pila de Combustible**

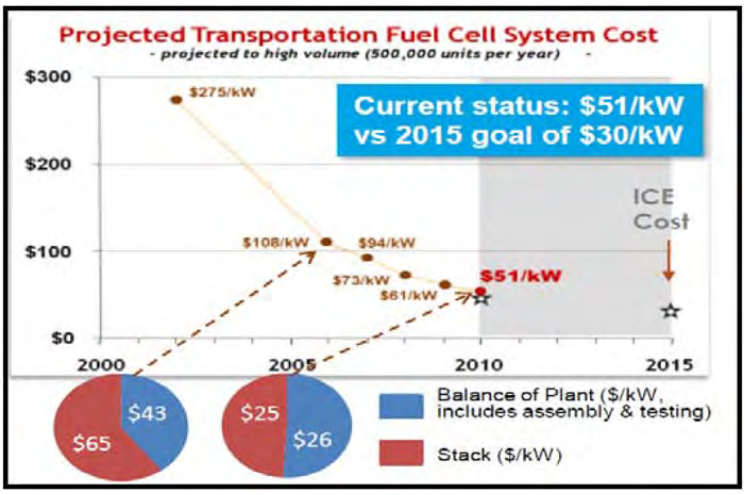


Figura 38: Coste proyectado del transporte de Pila de Combustible.

- **Costes de fabricación calculados en función del nivel de producción**

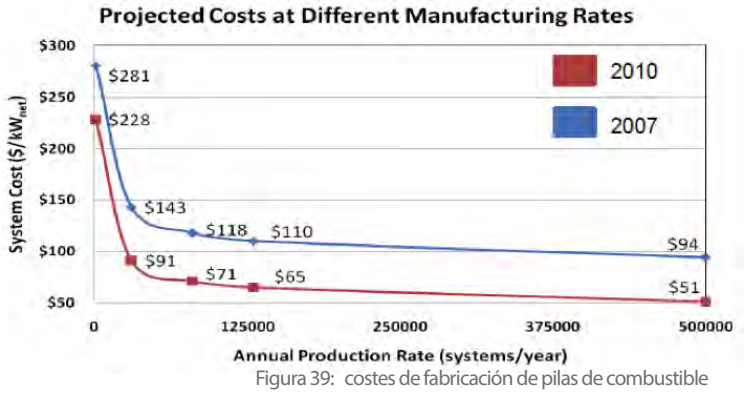


Figura 39: costes de fabricación de pilas de combustible

4.2.3. Bibliografía almacenamiento químico y electroquímico

- http://www.acohidrogeno.org/index.php?option=com_content&view=article&id=62:tecnologia-de-produccion-del-gas-hidrogeno-y-su-purificacion-&catid=27:energia-de-hidrogeno&Itemid=55
- http://www.crisisenergetica.org/forum/viewtopic.php?showtopic=37965
- http://ecoabc2.galeon.com/index.html
- http://ecoabc2.galeon.com/aficiones1058548.html
- http://ecoabc2.galeon.com/aficiones1058548.html
- http://en.wikipedia.org/wiki/European_Patent_Organisation
- http://en.wikipedia.org/wiki/Flow_battery
- http://en.wikipedia.org/wiki/Flow_battery

- http://en.wikipedia.org/wiki/Voltaic_pile
- www.ree.es
- http://www.emssiweb.com/cursos/tutoriales/sistema-electrico-en-car-audio-3/la-bateria-en-car-audio-3/5-clasificacion-de-las-baterias-18.html
- http://solete.nichese.com/tiposbaterias.html
- http://www.baterias.html
- http://www.todobaterias.com/optima_az.html
- http://www.baterias-y-pilas.html
- http://ayudaelectronica.com/clasificacion-de-las-baterias-de-plomo-acido/
- http://www.almacenamiento-de-energia.html
- http://www.unesa.net/unesa/html/sabereinvestigar/largoviaje/transportealmacenar.htm
- http://erenovable.com/category/almacenamiento-de-energia/
- http://www.monografias.com/trabajos26/la-pila/la-pila.shtml
- http://www.fierasdelaingenieria.com/nuevo-modo-de-almacenar-grandes-cantidades-de-energia-electrica/
- http://noticiasdelaciencia.com/not/1571/hacia_los_supercondensadores_capaces_de_almacenar_tanta_electricidad_como_una_bateria_de_plomo-acido/
- http://www.solener.cl/index.php?option=com_content&view=article&id=55&Itemid=20
- http://noticias.terra.com/noticias/proyecto_store_el_reto_de_almacenar_energaa/act2586613
- http://www.fundacionentorno.org/Casos-Empresariales/Primer,proyecto,europeo,almacenamiento,energia,electrica,gran,escala,ENDESA,3011.htm
- http://www.ecoticias.com/motor/49988/Noticias-energias-energias-renovables-verdes-limpias-alternativas-sostenibles-sustentables-eolica-geotermica-solar-termosolar-concentracion-eficiencia-energetica-definicion-tipos-ventajas-paneles-placas-mareomotriz-aerogeneradores-nuclear-co2-csp-bateria-litio-hibrido-electrico-coche-vehiculo-moto-biocombustibles-etanol-biocarburantes-silicio-biodiesel-biomasa
- www.fuelcellsworks.com
- http://www.eere.energy.gov
- www.reoltec.net

4.3. Almacenamiento eléctrico y magnético

4.3.1. Condensadores

Es el sistema más simple de almacenamiento de energía eléctrica. Un condensador es un dispositivo capaz de almacenar energía en forma de campo eléctrico en otras palabras, absorbe cargas eléctricas cuando se le somete a un campo eléctrico. Está formado por dos armaduras metálicas paralelas (generalmente de aluminio) separadas por un material dieléctrico.

Capacidad: se mide en faradios (F) y es la propiedad que tienen los cuerpos para mantener una carga eléctrica, es también, una medida de la cantidad de energía eléctrica almacenada para un potencial eléctrico dado. (C=Q/V)

- **Energía acumulada:** $E = \frac{CxV^2}{2}$
- **Energía por unidad de volumen:** EV = eV 2 / 2d

Depende del material del dieléctrico. Actualmente densidades de 0.15 Wh/m^3 con campos de 10 millones de V/m.

Una de las enormes ventajas de los condensadores es la enorme densidad de potencia que suministran cuando se cortocircuitan.

La vida útil de un condensador puede calcularse:

$$L_C = L_O \times 2^{\frac{T_O - T}{10}}$$

donde L_O es la vida media del capacitor a T_O como máx. 85 ºC o 105 ºC

Rango temperatura	L_O a 85 ºC
-40ºC a 85ºC	< 4000 hs
-40ºC a 85ºC	8000 hs

4.3.1.1. Tipos

4.3.1.1.1. Condensador de aire

Es un tipo de condensador formado por placas paralelas, el dieléctrico es el aire y todo ello está encapsulado en vidrio. La permitividad eléctrica es la unidad, por tanto sólo admite valores de capacidad muy pequeños. Funcionan bien a frecuencias elevadas ya que carecen de pérdidas y polarización en el dieléctrico de ahí que su uso más extendido sea en la radio y en el radar.

4.3.1.1.2. Condensador de mica

La mica presenta diversas propiedades que la hacen un adecuado dieléctrico de condensadores como son las baja pérdidas, exfoliación en láminas finas, soporta altas temperaturas, no se degrada por oxidación o con la humedad. Normalmente su conformación se basa sobre una cara de la lámina de mica se deposita aluminio que forma una armadura y se apilan varias de estas láminas soldando los extremos alternativamente a cada uno de los terminales. Funcionan bien a altas frecuencias y soportan tensiones elevadas, pero son caros y poco a poco van siendo sustituidos por otros tipos.

4.3.1.1.3. Condensador de papel

El dieléctrico es el papel parafinado, bakelizado o sometido a algún tratamiento que aumenta el aislamiento. Se disponen de la siguiente manera: se apilan dos cintas de papel, una de aluminio, otras dos de papel y otra de aluminio y se enrollan en espiral.

4.3.1.1.4. Condensador electrolítico

El dieléctrico es una disolución electrolítica que ocupa una cuba electrolítica. Con la tensión adecuada, el electrolito deposita una capa aislante muy fina sobre la cuba, que actúa como una armadura y el electrolito como la otra. Consigue capacidades muy elevadas, pero tienen una polaridad determinada, por lo que no son adecuados para funcionar con corriente alterna. La polarización inversa destruye el óxido, produciendo una corriente en el electrolito que aumenta la temperatura, pudiendo hacer arder o estallar el condensador. Siempre tienen polaridad y tienen una capacidad superior a 1 μF.. Existen de varios tipos:

- Condensador de tantalio
- Condensador para corriente alterna

a. Condensador de tantalio o de gota

Condensador electrolítico que emplea una finísima película de óxido de tantalio amorfo, que con un menor espesor tiene un poder aislante mucho mayor. Consigue corrientes de pérdidas bajas, mucho menores que en los condensadores de aluminio. Suelen tener mejor relación capacidad/volumen, pero arden en caso de que se polaricen inversamente. Polaridad y capacidad superior a μF, su forma de gota les da muchas veces ese nombre.

b. Condensador para corriente alterna

Formado por dos condensadores electrolíticos en serie con sus terminales positivos interconectados.

4.3.1.1.5. Condensador de poliéster, de policarbonato y de polipropileno

Está formado por láminas delgadas de poliéster sobre las que se deposita el aluminio que forma las armaduras que se apilan y se conectan por sus extremos. Del mismo modo se encuentran condensadores de policarbonato y polipropileno.

Su capacidad suele ser como máximo de 470nF, se presenta en forma plana y llevan sus datos impresos en forma de color recibiendo comúnmente la denominación de condensadores de ‘’bandera”.

4.3.1.1.6. Condensador cerámico

El dieléctrico está formado por varios tipos de cerámicas. Existen tipos formados por una sola lámina pero también pueden estar formados por varias láminas apiladas.

4.3.1.1.7. Proveedores

- **E.E.I., Srl** (equipaggiamenti elettonici Industriali) Italia
- **Circutor**, España
- **JBG Metafix**, Francia
- **Wytwórnia Urządzeń Chłodniczych "PZL - Dębica"** S., Polonia
- **Condensateurs Sic Safco**, Francia
- **ICEL, Srl.** Italia
- **Nucleonic, S.A.** España
- **ABB** en España

4.3.1.2. Supercondensadores

También conocidos como súper capacitores, pseudocapacitadores, condensadores electroquímicos de doble capa, ultracondensadores o ultracapacitores. Por sus siglas en inglés EDLCs.

Son condensadores electroquímicos que tiene una densidad de energía inusualmente alta en comparación con los condensadores electrolítico de alta capacidad. Los EDLCs comerciales cuentan con capacitancias de hasta 5000F, la mayor densidad de energía en la producción es de 30Wh/kg.

El uso de súper condensadores está motivado por las enormes ventajas que presentan. Gran período de operación, capacidad de manejar altos valores de corriente, valor de carga fácil de monitorear, alta eficiencia, gran rango de tensión, gran rango de temperatura, ciclos de funcionamiento largos, facilidad de mantenimiento, carga en segundos, impedancia baja.

La vida útil de un súper condensador disminuye conforme aumenta su capacitancia, pero actualmente contamos con dispositivos que superan una ***vida útil de 20 años*** con pérdidas en la tensión suministrada de alrededor de un voltio.
Un condensador de alta capacidad tiene un gran rendimiento (el 98% de la carga se devuelve); almacena mucha energía en relación a su peso (4Wh/kg), aunque no tanto como una batería; no presentan efecto memoria y tienen una gran capacidad de carga y descarga rápida (5kW/kg).

Es preciso señalar que tanto el proceso de carga como de descarga de un súper condensador no involucra reacciones químicas, por cuanto es un proceso altamente reversible y esto permite cargar y descargar por lo menos unas 500.000 veces sin que se perjudique el rendimiento del dispositivo.

Aunque también presentan desventajas como son la baja densidad de energía (1/5 de una batería electroquímica), las células tienen bajas tensiones, alta auto descarga en comparación con una batería electroquímica, requiere un sofisticado control electrónico y equipos de conmutación.

¿Podrán los supercondensadores reemplazar a las baterías?

Un supercondensador por sí solo no puede reemplazar a las baterías sin embargo, mediante la fusión de un supercondensador y una batería (híbrido de batería) será posible reemplazar la batería como la conocemos hoy en día.

En la siguiente figura se muestra una relación entre las distintas tecnologías existentes en el mercado y compara la densidad de energía almacenada, ka densidad de potencia y el tiempo de carga.

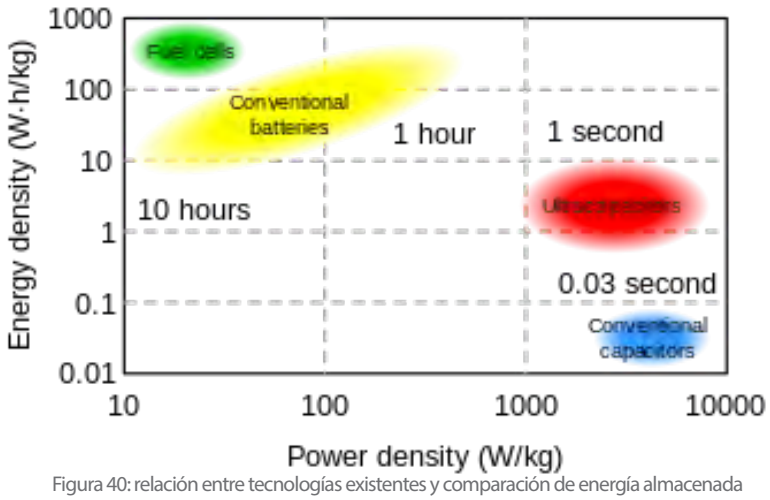


Figura 40: relación entre tecnologías existentes y comparación de energía almacenada

Según esta comparación los súper condensadores tienen una capacidad de almacenamiento de energía de 10 a 1000 veces superior que los condensadores convencionales manteniendo prácticamente la misma densidad de potencia. Esto quiere decir que un súper condensador tiene prácticamente la misma curva de carga y descarga y puede entregar tanta potencia en un peak de corriente como un condensador normal, pero con una cantidad de energía muy superior. Si lo comparamos con las baterías recargables, vemos que estas tienen una densidad de energía entre 1 y 500 veces superior pero su densidad de potencia es de entre 1 a 3 órdenes de magnitud inferior.

4.3.1.2.1. Tipos

Los supercondensadores se clasifican de acuerdo a los materiales que los componen, actualmente se distinguen cuatro tipos:

- Supercondensadores electrolíticos de 'entrecaras' de carbono de doble capa
- Supercondensadores no electrolíticos de 'entrecaras' de carbono de doble capa
- Supercondensadores acuoso de óxido de doble capa con pseudocapacitancia redox
- Supercondensadores de polímeros conductores

a. Supercondensadores electrolíticos de 'entrecaras' de carbono de doble capa

Los principales son los que utilizan:

- Hidróxido de sodio y potasio
- Ácido sulfúrico

En ellos la disolución se disocia en iones positivos de sodio o potasio, que ante la presencia de voltaje por aumento de la atracción entre cargas se acumula una mayor energía eléctrica.

b. Supercondensadores no electrolíticos de 'entrecaras' de carbono de doble capa

Los principales son:

- Aerogeles (sólido que posee una gran cantidad de líquido y una estructura que permite que se encuentren ambas fases combinadas)
- Nanotubos de carbono
- Carbón activado

- Soles

Son dispersiones de partículas sólidas en líquido que se encuentran indefinidamente en movimiento browniano. Para la formación de soles para condensadores se forma el óxido de metal elegido en agua, sea a altas temperaturas o con un exceso de base para formar el sol. Posteriormente el sol es gelado por deshidratación o aumento de pH. También se pueden formar soles orgánicos con resorcinol en formaldehído. El resultado de los procesos es la formación de un material homogéneo muy poroso que permite una alta capacitancia. Si el sol es combinado con la interfaz de carbono se calcula que puede alcanzarse una capacitancia de 400 faradios por gramo.

c. Supercondensadores acuosos de óxido de doble capa con pseudocapacitancia redox

Los principales son:

- Óxido de litio
- Bióxido de rutenio
- Bióxido de iridio
- Óxido de cobalto
- Bióxido de manganeso

Pueden fabricarse siguiendo la metodología anterior para elaborar un sol o también por la deposición de un óxido metálico por medio de un procedimiento de electrólisis. Se han hecho investigaciones donde se han alcanzado capacitancias de 400F/g con óxido de rutenio. Supercondensadores más rentables de alrededor de 50 F/g se han logrado con óxido de níquel. Una forma alternativa para generar la estructura porosa es la adición de óxido de litio a un metal como el platino; este material se le agrega ácido para retirar el litio y mantener la estructura porosa de escala nanométrica.

d. Supercondensadores de polímeros conductores

Se define como polímero conductor, sustancia orgánica que conduce la electricidad de manera parecida a la de un metal, buena reversibilidad entre estado conductor y no conductor y flexibilidad mecánica. Los principales son los de politiofeno, polipirrol y polianilina. Tienen una densidad de energía mayor a 500W/kg, y aún se estudian sus propiedades de capacitancia.



Figura 41: supercondensadores

4.3.1.2.2. Aplicaciones

Debido a sus propiedades de vida útil, manejo de tensión y corriente, los supercondensadores han sido utilizados en diversas aplicaciones:

a. Automóviles híbridos

Por la eficiencia en el uso de la energía estos dispositivos son un elemento prometedor para el desarrollo de medios de transporte que combinen la energía solar con la proveniente de combustibles fósiles. Su aprovechamiento se debe fundamentalmente a que permiten una mejor descarga de energía durante la aceleración del vehículo. Freightliner y Delphi demostraron su uso en sistemas automotrices de pasajeros, aunque BMW argumenta que hay poca sensibilidad para su regulación debido a las modificaciones hechas a la gasolina para reducir la emisión de contaminantes, por lo que es viable instalarlos en sistemas basados en hidrógeno.

b. Apoyo energético

Muchos proyectos en ingeniería, como el diseño de elevadores, requieren de ciclos donde en una etapa se requiera una baja descarga de energía y otros de una alta descarga (como cuando el elevador desciende y asciende). Esta demanda requiere de sistemas que permitan una regulación precisa de la energía suministrada y una alta capacidad de almacenamiento de energía. De esta manera los supercondensadores suministran la energía necesaria para subir el elevador sin necesidad de sobrecargar la red eléctrica.
En aplicaciones de energía solar es necesario estabilizar la tensión suministrado por las fotoceldas, por lo que se utilizan supercondensadores de 2400 F dispuestos en paralelo para estabilizar el suministro de energía eléctrica. De las fotoceldas generalmente se traslada la diferencia de potencial a una válvula de regulación de descarga ácida. Actualmente se estudia la manera de controlar la tensión a través de un banco de supercondensadores que permite disminuir los picos de tensión y proveer una corriente constante de 1.37 A por 45 segundos cada hora, gracias al almacenamiento de energía en el condensador y su liberación estable en un circuito equivalente RLC.

c. Almacenamiento de energía

Uno de los usos más extendidos de supercondensadores es su uso en sistemas micro electrónicos, memorias de computadoras y relojes y cámaras de alta precisión. Su uso permite mantener el funcionamiento de los dispositivos durante horas e incluso días. Una aplicación estudiada ampliamente en la actualidad es el uso de supercondensadores en sistemas UPS unido a sistemas de transferencia de energía acoplados por inducción (ICPT). Se utilizan para facilitar la transferencia de energía, hacer más eficiente la carga de energía eléctrica, permitiendo el aislamiento de los sistemas UPS para el funcionamiento de sistemas eléctricos.

d. Sistemas de transferencia de potencia

En el área de energía las propiedades de los supercondensadores son de gran importancia para la transferencia de energía. Los sistemas STATCOM (Compensadores Estáticos) son dispositivos de la familia de los sistemas de transmisión de corriente flexible alternante (FACTS), y se utiliza para el control de los picos de tensión en sistemas eléctricos. Cuando se conectan con sistemas de transferencia de potencia a elementos STATCOM, se produce una gran inductancia que produce un incremento en la corriente y picos de tensión, por lo que es necesario tener condensadores de gran capacitancia para compensar este fenómeno. Su uso permite mantener una corriente constante y menores picos de tensión para facilitar la transmisión de la energía eléctrica.

4.3.1.2.3. Costos

Sistema	Rango de energía	US$/kWe	US$/kWe
Energía hidráulica inyectada	100 - 1.000	600 - 1.000	10 - 15
Almacenamiento de energía de aire comprimido (CAES)	50 - 1.000	500 - 1.000	10 - 15
Volantes de inercia	1 - 10	200 - 500	100 - 300
Baterias	Plomo ácido - 0,5 - 100 Hidruro metálico de níquel - 0,5 - 50 Li-ion	100 - 200 200 - 400 200 - 400	150 - 300
Almacenamiento de energía magnética superconductora	10 - 1.000	300 - 1000	300 - 3000
Supercondensadores	0,1 - 10	300	3600
Térmico	0,1 - 10		

Tabla 13: costos de capital estimados de tecnologías de almacenamiento de energía.

A continuación se presenta una tabla de comparación entre súper condensadores de distintos proveedores y una batería de iones de litio, con el fin de tener una idea de las capacidades de almacenamiento de energía, de densidad de potencia, costo y dimensiones físicas de estos componentes.

Súper condensadores	Energía (KJ)	Densidad Energía (W/hr)	Densidad Potencia (W/Kg)	Costo (USS)	Volumen (cm^2)	Peso (Kg)	ESR (mQ)	USS/ Wh
Maxwell	0,031	0,04	1500	10	3,8	0,0064	130	250
Matsuchita	0,021	0,006	769	-	3,1	0,006	125	-
EPCOS	0,031	0,04	1900	-	3,2	0,0064	110	-
Batería Li-ion 4 Ah	204,5	56,8	<1000	150	24,6	0,39	500	2,64

Tabla 14: comparación entre súper condensadores y una batería de iones de litio.

4.3.1.2.4. Proyectos relacionados

- **Uso de condensadores como baterías.**

Los nanotubos insertados entre la célulosa forman diminutos condensadores, que agrupados forman un supercondensador con una capacidad de almacenamiento comparable a la de una batería, con la ventaja añadida de que estas baterías de papel son baratas y no usan materiales tóxicos.

¿Cómo pueden ayudar los nanotubos a fabricar supercondensadores?

La clave reside en que la capacidad de un condensador viene determinada, entre otras cosas, por el grosor del dieléctrico que separa los electrodos; cuanto más fino sea el dieléctrico, más capacidad tendrá el condensador; pues bien, el uso de nanotubos permite que el grosor del dieléctrico sea de nanómetros (un nanómetro es la millonésima parte de un milímetro).

http://teleobjetivo.org/blog/uso-de-condensadores-como-baterias.html

- Supercondensador de papel

Gracias al uso de nanotubos de carbono y papel corriente se pueden conseguir supercondensadores baratos y eficientes.

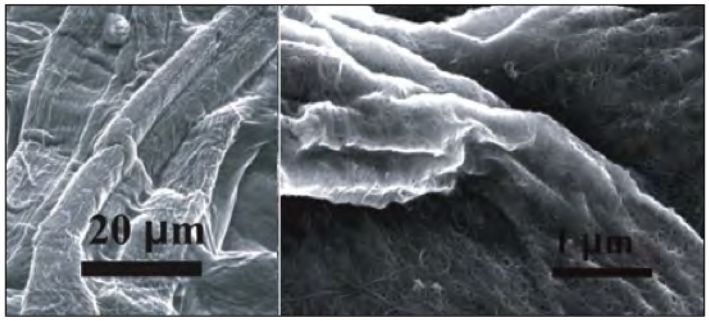


Figura 42: supercondensador de papel.

Recientemente, investigadores de la Universidad de Stanford dirigidos por Yi Cui han conseguido aplicar Nanotecnología a la confección de un supercondensador ultraligero flexible hecho con humilde papel de fotocopiadora. Para ello basta con recubrir el papel con una tinta especial hecha de nanotubos de carbono. El añadido de los nanotubos hace que el papel esté cubierto por un "fibrado" de pelillos nanométricos (los nanotubos). Esto hace al papel altamente conductor, permitiendo a los electrones moverse muy fácilmente. Además consigue aumentar su superficie gracias a las nanoestructuras que contiene. La capacidad de un condensador cualquiera depende del área de las placas (aunque éstas estén enrolladas).

Los investigadores estiman que un supercondensador de este tipo aguantaría unos 40.000 ciclos de carga,

o lo que es lo mismo, un orden de magnitud más que las baterías de litio. Estas hojas tratadas tienen una resistencia eléctrica de sólo 1 Ω con un recubrimiento de sólo 500 mm de grosor y una capacidad de 200 faradios por gramo. En términos de energía almacena 7,5 vatios·hora por kilogramo, aún por debajo de los 30 Wh/kg de las baterías de plomo, pero como el coste de los nanotubos está bajando, el papel es barato y el dispositivo comercial duraría mucho, al final sería un sistema más barato.

Este supercondensador de papel estaría especialmente indicado para autos híbridos o eléctricos, beneficiándose de la velocidad de carga-descarga y de la buena relación superficie/volumen. Otro uso sería como almacenamiento de corriente durante las horas valle de consumo eléctrico y el uso posterior de esta energía almacenada durante los picos. También podría emplearse como simple electrodo para muchas aplicaciones.

http://neofronteras.com/?p=2944

http://www.autoalias.com/nanotune-anuncia-un-ultracapacitor-para-coches-electricos/

- **Supercondensadores a partir de materiales carbonosos para almacenamiento de energía.**

Consiste en la fabricación de supercondensadores de bajo costo y alta capacidad de almacenamiento de energía utilizando como materiales activos carbones activados y materiales compuestos óxido/carbono. Los carbones activados se prepararán a partir de residuos de aserraderos del país, material abundante que en general constituye un residuo no aprovechado y generador de contaminación ambiental. Los carbones se activarán por oxidación y se caracterizarán desde el punto de vista estructural y textural, estudiando también su química superficial. Estas actividades se realizarán en el LAFIDESU y la Cátedra de Fisicoquímica de la Facultad de Química.
http://www.anii.org.uy/web/proyectos_beneficiarios/supercondensadores-partir-de-materiales-carbonosos-para-almacenamiento-de-e-0

- **Nanotubos de carbono**

Modelos experimentales recientes, desarrollados en el Instituto Tecnológico de Massachusetts, emplean nanotubos de carbono alineados verticalmente para multiplicar la superficie activa. Los nanotubos poseen una forma regular y una anchura de solo varios diámetros atómicos. Proporcionan un área efectiva mucho mayor y un incremento notable en la capacidad de almacenar cargas. Su diámetro es la tercera parte de la diezmilésima de un cabello, y su longitud 100,000 veces mayor que su espesor.

- **Nano partículas de óxido**

Usando una tecnología diferente, el proyecto europeo HESCAP (siglas en inglés de Sistema de Almacenamiento de Energía basado en Supercondensadores de Alta Energía y Densidad de Potencia) busca mantener la larga vida útil de los supercondensadores actuales y multiplicar casi por diez su capacidad de almacenamiento para crear sistemas más eficaces de reservas de energía. La nueva tecnología se basa en descubrimientos recientes sobre las propiedades de nano partículas de óxidos. Estas partículas muestran un comportamiento promisorio cuando se conforman como una membrana nano porosa.

- **Sistemas inteligentes estabilizadores de red.**

El consorcio SINTER presenta su proyecto Sistemas Inteligentes de Estabilización de red, cuyo objeto principal es la integración de energías renovables (eólica, fotovoltaica e hidráulica), incluyendo almacenamiento (hidrógeno, supercondensadores, baterías, bombeo hidráulico, etc.), con funciones de estabilización de red.

La actividad del proyecto se extiende del 22 de abril de 2009 hasta el 31 de diciembre de 2011 (financiado, en el marco del Plan E, por el Ministerio de Ciencia e Innovación hasta abril de 2010). El coste de esta iniciativa es de 4,3 millones de euros, de los que el 67% (2,89 M €) ha sido aportado por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través del Plan E.

El consorcio SINTER está formado por ADES, INYCOM, Fundación CIRCE, Fundación Hidrógeno Aragón, Centro Nacional del Hidrógeno y CIEMAT/CEDER

http://www.ades.tv/es/idi/proyectos/proyecto-sinter/id/28

- **Hacia los supercondensadores capaces de almacenar tanta electricidad como una batería de plomo ácido.**

Un nuevo material basado en el grafeno y del que se ha logrado averiguar cómo es su estructura nanométrica, se perfila ahora como un candidato idóneo para ser incorporado a los dispositivos de almacenamiento de energía conocidos como supercondensadores.

Los supercondensadores hechos de este material resultarían idóneos para abastecer de energía a los automóviles eléctricos y para nivelar el suministro eléctrico aportado por fuentes intermitentes de energía, como la solar y la eólica.

El material se creó recientemente en la Universidad de Texas, en Austin. Y el nuevo estudio sobre sus propiedades lo ha hecho el equipo de Eric Stach, especialista en ciencia de los materiales, del Laboratorio Nacional estadounidense de Brookhaven.

Los supercondensadores hechos con este material tienen una capacidad de almacenamiento de energía que se acerca a la densidad de energía de las baterías de plomo-ácido pero mantienen la capacidad de descargar rápidamente su energía, lo que es característico de los condensadores.

http://noticiasdelaciencia.com/not/1571/hacia_los_supercondensadores_capaces_de_almacenar_tanta_electricidad_como_una_bateria_de_plomo-acido/

4.3.1.2.5. Proveedores.

- Mouser electronics
  - http://es.mouser.com/Passive-Components/Capacitors/Supercapacitors/_/N-5x76s/
- Matsuchita
- EPCOS
- Cooper Bussmann México
- Shandong Heter Lampson Electronic Co., Ltd, China
  - http://htlampson.com
- BOLETAI ELECTRONICS LTD, Hong Kong
  - http://www.boletai.com http://www.aliexpress.com/store/805713
- Ningguo Tuotian Electronic Appliance Co., Ltd., China
  - http://www.chinatuotian.com
- Cellergy, Israel.
  - http://www.cellergycap.com
- Shanghai Aowei Technology Development Co., Ltd
- Shangai, China
  - http://www.aowei.com

- Jinzhou Kaimei Power Co., Ltd, China
  - http://www.kamcap.com
- Vina Technology Co., Ltd.
  - www.//vina.co.kr
- LS MTRON LTD
  - http://www.Ismtrom.com http://www.ultracapacitor.co.kr
- Shenzhen Suyang Electronics Co., Ltd, China
  - http://www.syelec.com

4.3.2. Campos magnéticos

4.3.2.1. Bobinas superconductoras

SMES - Superconducting Magnetic Energy Storage

Superconductividad es el estado de resistencia cero.
Es un sistema de almacenamiento de energía que permite almacenar la energía bajo la forma de un campo magnético creado por la circulación de una corriente continua en un anillo superconductor que está refrigerado a una temperatura por debajo de la temperatura crítica de superconductividad.

Sus componentes típicos son:

- Bobina superconductora
- Sistema de electrónica potencia
- Sistema de refrigeración criogénico

La bobina superconductora se carga, la corriente ya no disminuye y la energía magnética puede almacenarse indefinidamente. El sistema de acondicionamiento de energía utiliza un inversor /rectificador para transformar la corriente alterna (CA) a corriente continua (DC).

Hay varias razones para utilizar este tipo de almacenamiento en lugar de otros, la más importante es que el tiempo de retardo entre la carga y la descarga es muy corto por tanto, la energía está disponible casi instantáneamente y la producción a alta potencia se puede proporcionar en un breve periodo de tiempo. Otra ventaja es la poca pérdida de potencia en comparación con los demás sistemas. Además decir que las partes principales que lo forman son inmóviles lo que resulta de alta fiabilidad.

La energía almacenada por una bobina que conduce una corriente viene dada por:

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

E= energía (Julios)
L=inductancia (Henrios)
I= corriente medida (Amperios)

4.3.2.1.1. Tipos

a. Por su comportamiento físico

- **De tipo I**
  Cambio brusco de una fase a otra
- **De tipo II**
  Si pasan por un estado mixto en que conviven ambas fases

b. Por la teoría que los explica

Llamándose convencionales o no convencionales.

c. Por el material

- **Elementos puros**
  La mayoría de los superconductores que son elementos puros son de tipo I.

- **Aleaciones**
  NbTi (niobio-titanio), AuIn (oro-indio), URhGe (aleación de uranio, rodio y germanio)

- **Orgánicos**
  Estructuras de carbono (fulerenos y nanotubos)

- **Cerámicas**
  El grupo YBCO (óxido de itrio, bario y cobre), el diboruro de magnesio (MgB2) cuya temperatura crítica es 39k lo que lo convierte en el superconductor convencional de temperatura crítica más alta conocido.

d. Por su temperatura crítica

- De baja temperatura (LTSC)
  Aquellos cuya temperatura crítica está por debajo de los 77K.

- De alta temperatura (HTSC)
  Aquellos cuya temperatura crítica está por encima de los 77K.

La razón por la que se suele tomar dicha temperatura está en la facilidad con lo que se puede enfriar el material ya que por encima de 77K podemos utilizar métodos de enfriado de bajo coste como el nitrógeno líquido, en lugar del helio líquido.

A bajas temperaturas los materiales más comunes se suelen enfriar con helio líquido, el montaje necesario es complejo y costoso.

Desde el punto de vista de las aplicaciones prácticas en los superconductores de alta temperatura se concentran los centros de investigación. La principal desventaja de estos materiales es su composición cerámica lo que lo hace poco apropiado para fabricar cables mediante deformación plástica aunque se van desarrollando nuevas técnicas.

4.3.2.1.2. Costos

Para determinar el costo de los SMES habrá que tener en cuenta la eficiencia y el costo del dispositivo.

La razón fundamental reside en la densidad comparativa actual de los materiales de LTSC y HTSC. La corriente crítica de cable HTSC es menor que el alambre de LTSC de 5 a 10 teslas (T) por lo tanto el costo será mayor.

Además como el tamaño de las SMES va de 20 a 200MW/h, el costo del conductor aumenta un factor de 10 en cada paso.

4.3.2.1.3. Proyectos relacionados

- **Grandes bobinas enterradas bajo tierra.**

Se ha propuesto almacenar energía mediante grandes bobinas enterradas bajo tierra, hechas de materiales superconductores, pues en estas condiciones las corrientes serían elevadas y los campos magnéticos que se producirían serían intensos. Así, se puede lograr que una corriente eléctrica se mantenga almacenada girando en la bobina sin pérdidas. Dichas bobinas deben estar provistas de un sistema de enfriamiento para alcanzar las condiciones de superconductividad.

- **Superconductores de alta temperatura con nuevos materiales.**

En México, el Instituto de Investigaciones en Materiales y el Instituto de Física, ambos de la UNAM, han producido diversos materiales superconductores de alta temperatura hechos a base de óxidos de cobre con elementos de las tierras raras como lantano e itrio.

- **Los superconductores de alta temperatura revolucionan la producción de electricidad mediante energía eólica.**

Ahora mismo, se están planeando turbinas eólicas marinas de 10 MW con una nueva generación de estaciones eléctricas. La empresa americana American Superconductor (AMSC), la empresa alemana Zenergy Power en cooperación con la británica Converteam y el Instituto Danés de Investigación DTU se están esforzando actualmente por desarrollar estos sistemas hasta hacerlos viables comercialmente.

AMSC está desarrollando un generador junto con el grupo taiwanés TECO Westinghouse. Según fuentes de la empresa, el peso de la góndola se reduce a la mitad, aunque no quieren dar a conocer el coste de la aplicación de esta tecnología. Pero aseguran que pueden competir con las máquinas convencionales, y apuntan hacia las ventajas de la reducción de peso, el aumento de eficiencia y la seguridad. AMSC quiere entrar en el mercado en tres ó cuatro años.

AMSC instala el equipo de refrigeración en la base del aerogenerador. Desde allí, se transporta el helio por tuberías hasta las bobinas aisladas que contienen los superconductores. Los sistemas de refrigeración alcanzan temperaturas de entre -243ºC y -228ºC.

http://news.soliclima.com/noticias/energia-eolica/los-superconductores-de-alta-temperatura-hts-revolucionan-la-produccion-de-electricidad-mediante-energia-eolica

- **Descubiertos nuevos superconductores de alta temperatura**

Un grupo de investigadores chinos y japoneses han descubierto una nueva familia de materiales

superconductores de alta temperatura. Se trata de unos compuestos de hierro y arsénico que se vuelven superconductores a 55 grados kelvin.

http://teleobjetivo.org/blog/descubiertos-nuevos-superconductores-de-alta-temperatura.html

- **Un equipo del CSIC obtiene superconductores nanotecnológicos y corrientes eléctricas récord.**

Los resultados, aparecidos en la revista Nature Materials, se han conseguido mezclando nanopartículas aislantes con un superconductor. Así las propiedades mejoran de tal forma que puede aumentarse de forma espectacular los campos magnéticos generados con estos materiales.
Los materiales superconductores son capaces de transportar corrientes eléctricas 100 veces superiores a las que transporta el cobre y por ello pueden usarse para generar campos magnéticos mucho más elevados que con los metales convencionales.

http://www.solociencia.com/quimica/07061406.htm

- **Sistema de carga inductiva para los coches eléctricos**

Siemens y BMW se han unido para crear un nuevo sistema de carga inductiva para vehículos eléctricos. Este nuevo sistema también se puede utilizar como unidad de almacenamiento, lo que permitiría acumular el excedente de producción mediante energías renovables como la energía solar o la energía eólica.

Uno de los puntos más importantes es la eficiencia de transmisión de la energía entre la bobina secundaria instalada en el coche y las baterías del mismo. Gracias a esta tecnología se consigue una eficiencia de más del 90 por ciento en esta transferencia energética.

Además, el sistema no produce ningún daño a otros aparatos electrónicos ni a las personas, pues el campo magnético que genera la electricidad no supera en ningún caso, el límite internacional recomendado de 6,25 microteslas.

El próximo mes de junio Siemens y BMW testearán un prototipo con una potencia de carga de 3,6 kW. Sistemas de carga de inducción de este tipo podrían ser una solución para los problemas de carga de vehículos que suelen estacionarse en lugares públicos durante cortos periodos, como ocurre con los taxis.

http://www.muyinteresante.es/sistema-de-carga-inductiva-para-los-coches-electricos

- **Campos magnéticos**

Un equipo de científicos ha ideado un nuevo tipo de batería que almacena la energía en forma de campos magnéticos y que, en principio, tiene una capacidad para proporcionar energía que va más allá de todo lo conocido, superando incluso a los combustibles, como la gasolina.

Día tras día, las baterías aumentan su rendimiento y bajan su precio, pero mantienen algo inalterable: su proceso químico. Se cambian materiales, se aplican nanotecnologías, se optimizan reacciones y se estudian nuevas combinaciones de estos elementos, pero siempre en formato químico. Un grupo de investigación de la Universidad de Miami en coordinación con otro de la Universidad de Tokio y Tohoku, han publicado en la prestigiosa revista Nature un interesante trabajo que abre un nuevo campo de estudio en el mundo del almacenamiento energético. Demuestran que es posible construir una batería que utilice un spin magnético para cargarse, de modo parecido a como lo hacen los discos duros que tan conocidos nos resultan.

Dicho sistema almacenaría energía solo con aplicarle un campo magnético, que luego puede extraerse de la misma manera, convirtiendo este sistema en un espléndido almacén de electricidad. El secreto de esta tecnología estriba en el uso de nano-imanes, que permiten aprovechar este efecto de "spin battery" para dejar atrás cualquier tipo de reacción química y prescinde también de cualquier parte móvil que pudieran tener las baterías tradicionales. Además, se prevé que se recarguen de modo casi instantáneo.

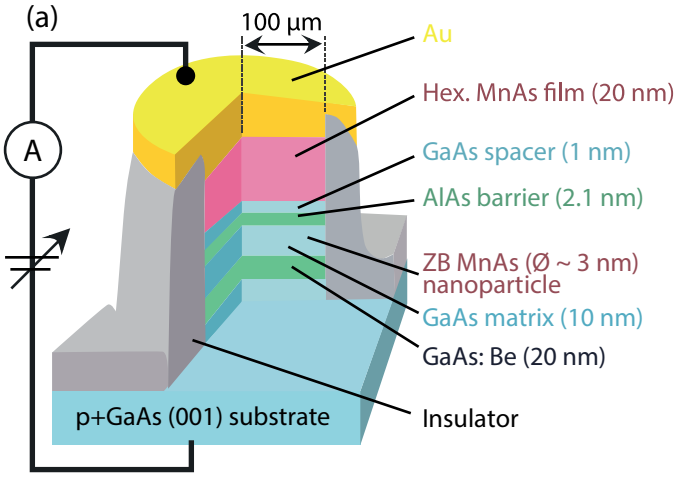


Figura 43: almacenamiento en forma de campo magnético.

- **Estructura batería magnética**

Los investigadores han creado un dispositivo llamado "batería de spin" que se carga aplicando un campo magnético a un nanodispositivo llamado Magnetic Tunnel Junction (MJT). Aunque la existencia de este dispositivo ya se había predicho, los resultados han superado todas las previsiones. Uno solo de estos dispositivos, que como se ve en el gráfico tiene un diámetro de una milésima de milímetro, fue capaz de proporcionar una corriente estable durante varias decenas de minutos.

El dispositivo que ha servido de experimento apenas tiene el tamaño de un cabello humano. Recordemos que estamos hablando de nanotecnología, pero el físico Stewart Barnes afirma que aunque la energía generada ahora mismo apenas ha sido suficiente para encender un pequeño LED, se han hecho cálculos que permiten especular que dentro de poco tiempo, ese mismo dispositivo proporcionará electricidad para mover un coche unos kilómetros. Si ampliamos el sistema al tamaño de una batería normal, el automóvil podría recorrer miles de kilómetros sin tener que recargar.

Esto significa que una batería formada por varios millones de MJTs, que tendría un tamaño no superior al de una caja de cerillas, podría proporcionar energía suficiente como para mover un coche durante muchos kilómetros. Lo que convierte en revolucionario a este descubrimiento es la densidad de energía. Cuando quemamos una cierta cantidad de combustible, obtenemos una cierta cantidad de energía; con las baterías eléctricas ocurre lo mismo, por cada cantidad de electrólito podemos almacenar una cierta cantidad de electricidad; esto es lo que se llama la densidad de energía.

http://www.newenergyandfuel.com/

- **ABB mostró sus planes de desarrollo de un prototipo de SMES de 3.3 kilovatios-hora.**

El dispositivo almacenará electricidad en forma de un campo magnético generado por la corriente continua circulante por unos cables superconductores. La geometría de las bobinas superconductoras crea un campo electromagnético altamente contenido, pero se requiere relativamente poca energía para mantener el campo. La energía se libera descargando las bobinas.

ABB está colaborando con el fabricante de cables superconductores SuperPower, con el Laboratorio Nacional de Brookhaven y con la Universidad de Houston como parte de la beca de 4,2 millones de dólares de la ARPA-E. El objetivo final del grupo es desarrollar un dispositivo de 1 a 2 megavatios-hora a escala comercial que tenga un coste competitivo con las baterías de plomo-ácido.

http://www.technologyreview.es/read_article.aspx?id=36932

- **Materiales que se hacen superconductores con vino tinto y con sake**

http://www.elpais.com/articulo/sociedad/Materiales/hacen/superconductores/vino/tinto/sake/elpepusoc/20110307elpepusoc_8/Tes

http://patentados.com/invento/procedimiento-impregnacion-agua-bobinas-superconductoras.html

4.3.2.1.4. Proveedores

- Bruker-EST
  - http://www.bruker-est.com/
- General electric company
  - http://www.ge.com/es/
- Argonne National Laboratory - Argonne, Illinois. (laboratorio investigación)
  - http://www.anl.gov/Media_Center/index.html
- American Superconductor Corporation - Boston, MA.
  - http://www.amsc.com/
- HYPRES Inc. - Elmsford, New York.
  - http://www.hypres.com/
- TRW - Redondo Beach, California.
  - http://www.trw.com/

4.3.3. Bibliografía almacenamiento eléctrico y magnético

4.3.3.1. Condensadores

- http://es.wikipedia.org/wiki/Condensador_de_alta_capacidad#Clasificaci.C3.B3n_y_Elaboraci.C3.B3n_de_Supercondensadores
- http://www1.ceit.es/asignaturas/tecener2/Almacenamiento.pdf
- http://www.frbb.utn.edu.ar/electronica/trabajos-alumnos/Antivero-Flores-Galasso/aplicaciones_cap_electroliticos.pdf
- http://web.ing.puc.cl/~power/mercados/almacena/Almacenamiento_Energia_archivos/Almacenamiento_Energia.pdf
- http://www.supercapacitors.org/
- http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_double-layer_capacitor
- http://www.electrochem.org/meetings/scheduler/abstracts/214/0046.pdf
- http://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_role_of_the_supercapacitor
- http://www.nextag.com/super-capacitor/compare-html
- http://es.scribd.com/doc/34610290/Analisis-de-Fuentes-de-Energia-y-Desarrollo-de-Fuente-Fotovoltaica-para-Dispositivos-de-Redes-de-Sensores-Inalambricos

4.3.3.2. Campos magnéticos

- http://quamtum.blogspot.com/2009/05/cientificos-logran-almacenar-energia-en.html
- http://es.wikipedia.org/wiki/Superconducting_Magnetic_Energy_Storage
- http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/119/htm/sec_15.htm
- http://en.wikipedia.org/wiki/Superconducting_magnetic_energy_storage
- http://www.cienciahoy.org.ar/hoy01/superconductividad.htm
- http://es.wikipedia.org/wiki/Clasificaci%C3%B3n_de_los_superconductores
- http://www.slideshare.net/salmonete/superconductores-1560825
- http://en.wikipedia.org/wiki/Superconducting_magnetic_energy_storage

4.4. Almacenamiento térmico

4.4.1. Calor sensible y calor latente

Se denomina calor sensible a la energía calorífica que, aplicada a una sustancia, aumenta su temperatura. Calor sensible es aquel que recibe un cuerpo y hace que aumente su temperatura sin afectar su estructura molecular y por lo tanto su estado. En general, se ha observado experimentalmente que la cantidad de calor necesaria para calentar o enfriar un cuerpo es directamente proporcional a la masa del cuerpo y el número de grados en que cambia su temperatura. La constante de proporcionalidad recibe el nombre de calor específico. El calor sensible se puede calcular por:

$$Qs = \Delta HL = m\ Cp\ (t2 - t1)$$

En donde m es la masa del cuerpo; Cp es el calor específico a presión constante (definido como la cantidad de calor requerida para aumentar en un grado la temperatura de la unidad de masa de un cuerpo a presión constante), t2 es la temperatura final y t1 es la temperatura inicial del cuerpo.

Si el proceso se efectuara a volumen constante, entonces el calor sensible sería

$$Qs = \Delta UL = m\ Cv(t2 - t1)$$

En donde Cv es el calor específico a volumen constante. Los valores de calor específico varían también con la temperatura ambiente y el estado físico de agregación de las sustancias.

En cambio, **calor latente** se refiere al calor "escondido", es decir que se suministra pero no "se nota" el efecto de aumento de temperatura, ya que por lo general la sustancia a la que se le aplica aumentará su temperatura en apenas un grado centígrado, como un cambio de fase de hielo a agua líquida y de ésta a vapor. El calor sensible sí se nota, puesto que aumenta la temperatura de la sustancia, haciendo que se perciba como "más caliente", o por el contrario, si se le resta calor, la percibimos como "más fría".

4.4.1.1. Almacenamiento por calor sensible o capacidad calorífica

Diversos tipos de materiales líquidos, sólidos y combinaciones de líquidos y sólidos, pueden almacenar energía por cambios de temperatura. Esta energía almacenada es igual al cambio de energía interna que sufre el material al cambiar su temperatura y viene a ser igual al calor sensible (Qs)

Una regla de tipo práctico para determinar si un material es apropiado para utilizarse como medio de

almacenamiento, es que este debe ser capaz de almacenar entre 300 y 600 kJ/°C-m^2 de área de colector, como mínimo. También encontramos que cuanto mayor sea la temperatura que pueda alcanzar el medio de almacenamiento, tanto menor será el tamaño del sistema, aunque las pérdidas se hacen más evidentes. Por ejemplo, 1000 litros de agua pueden almacenar aproximadamente 84 MJ de energía cuando su temperatura aumenta de 30 a 50 °C y 168 MJ cuando la temperatura varía de 30 a 70 °C.

4.4.1.1.1. Almacenamiento en agua.

El agua es el medio ideal de almacenamiento para sistemas activos y pasivos, debido a que tiene una gran capacidad calorífica y por lo tanto mayor capacidad de almacenamiento. El agua puede almacenar casi cinco veces más energía (4.186 kJ/kg-°C) que la que puede almacenar la misma masa de roca o piedra (0.88 kJ/kg-°C). Además, el medio de transporte de energía, hacia o de la unidad de almacenamiento, se hace a través de la misma agua. Esta también puede utilizarse en forma directa o mediante el uso de cambiadores de calor y de manera continua a lo largo del día.

Algunas desventajas que se tienen al utilizar el agua como medio de almacenamiento, es que se necesitan depósitos que generalmente son grandes y caros, se oxidan si son de metal y hay grandes pérdidas de calor por conducción y convección que tienen que ser evitadas utilizando aislantes. Otro aspecto es que la energía es liberada a diferentes temperaturas.
Una de las aplicaciones más comunes se da en los calentadores solares de agua para uso doméstico.

4.4.1.1.2. Almacenamiento en piedras o rocas.

Las rocas o piedras también son un buen medio de almacenamiento. En sistemas activos, generalmente se usa lechos de piedra bajo tierra o lechos empaquetados. Como ya se había mencionado, el aire es el fluido de trabajo que remueve o adiciona el calor de la unidad de almacenamiento. En este caso, el calor por lo general no puede ser adicionado y removido al mismo tiempo.

Aunque las rocas o piedras no tienen un calor especifico alto, son buenos como medio de almacenamiento debido a que tienen una gran densidad, son de bajo costo, tienen conductividad térmica baja y no tienen problemas de corrosión.

4.4.1.2. Almacenamiento por calor latente o cambio de fase

La energía que una sustancia necesita para cambiar de fase, generalmente es mayor que la que se ocupa para tener incrementos de temperatura pequeños en la misma sustancia. Esto da la pauta para pensar que se puede aprovechar el cambio de fase de algunas sustancias para utilizarlas como medios de almacenamiento de energía solar. La idea es que la sustancia absorba la energía solar de forma directa (sistema pasivo) o mediante un colector solar (sistema activo) y cambie de fase. Al cambiar de fase la sustancia conserva en forma latente la energía absorbida. Esta será cedida posteriormente, cuando la sustancia regrese a su estado original.

Los cambios de fase pueden ser sólido-líquido, líquido-vapor y sólido-sólido. El cambio de fase líquido-vapor casi no se utiliza debido a que el vapor genera grandes presiones y en muchos casos no resulta práctico trabajar con este tipo de sistemas debido a que este tiene que ser diseñado para soportar presiones altas y por lo tanto resulta más complicado y costoso. Por esta razón, el aprovechamiento se centra en los cambios de fase líquido-sólido y sólido-sólido.

Las sustancias que pueden utilizarse como medios de almacenamiento por cambio de fase sólido-líquido pueden ser muy variadas (hielo, sustancias orgánicas, sales hidratadas, compuestos inorgánicos y metales o aleaciones). Algunas tienen puntos de fusión altos por lo que se haría necesario utilizar colectores concentradores para poder obtener altas temperaturas y provocar el cambio de fase en la sustancia.

El tener más capacidad de almacenamiento en las sustancias, reduce el tamaño de los sistemas de almacenamiento. Por ejemplo, el agua líquida tiene un calor específico igual a 4.186 kJ/kg-°C y su calor de solidificación o fusión es igual a 334.24 kJ/kg. En consecuencia el agua puede almacenar aproximadamente 80 veces más energía al cambiar de fase, que como líquido al cambiar su temperatura en 1°C. Otra ventaja de estos sistemas es que liberan la energía a una temperatura casi constante.

Algunos de los problemas que presentan este tipo de sales son los que mencionamos a continuación:

1. En algunos casos la sal presenta un sobreenfriamiento, o falla de la sal para solidificarse en la temperatura respectiva.
2. Segregación de los componentes de la mezcla por efecto de la gravedad mientras se encuentra en fase líquida.
3. Degradación de la sal después de varios ciclos de uso.
4. Falla de los recipientes que contienen las sales debido a que estas son corrosivas.
5. Área de contacto grande entre la sustancia y el fluido de trabajo que transporta la energía de y hacia el tanque almacén, en caso de sistemas activos.

Algunos de estos problemas han sido resueltos parcialmente. Por ejemplo, la adición de bórax (tetraborato de sodio decahidratado) a la sal de Glauber (Na2SO4.10H_2O) elimina el sobreenfriamiento provocando la cristalización entre los 28 y 29 °C, con su consecuente liberación de energía. Por otro lado, existen ciertos agentes químicos que resuelven el problema de la segregación o separación de la sustancia. Estos agentes, forman una especie de matriz microscópica que mantiene a los componentes en suspensión. Finalmente, el problema de la corrosión en los tanques de almacenamiento se resuelve parcialmente mediante el uso de tanques hechos de diversos plásticos. El uso principal de este tipo de sistemas, que pueden ser pasivos o activos, es en el acondicionamiento calorífico de edificios y viviendas y en diversos procesos industriales.

4.4.1.2.1. Almacenamiento de energía térmica mediante cambio de fase como estrategia de ahorro en sistemas de climatización

El **almacenamiento de energía** por cambio de fase como estrategia de ahorro consiste en la realización de ciclos de carga y descarga de una reserva térmica asociada a plantas enfriadoras, con el fin de disminuir los costes de producción de dichas plantas y las emisiones de CO_2 asociadas al consumo eléctrico.



Figura 44: almacenamiento de energía térmica.

Dicha disminución se obtiene en general desplazando al horario nocturno las franjas punta de producción de frío. Mediante esta técnica podemos reducir la potencia eléctrica contratada y la capacidad frigorífica instalada, remplazando plantas enfriadoras por sistemas de almacenamiento pasivos con garantías del fabricante comparables a los estándares de aquellas.

El retorno de la inversión se obtiene mediante el aprovechamiento de políticas de tarificación nocturna, el ahorro en los costes de mantenimiento

y la disminución de la potencia contratada. En el caso de la climatización, la disminución en las emisiones de CO_2 puede mejorar la calificación energética de una instalación y en aquellos climas con importante oscilación térmica en verano, esta técnica puede hacer posible ahorros netos en el consumo eléctrico de las plantas. Por sí sólo, un sistema de almacenamiento de energía aumenta la potencia disponible en el primario allí donde la demanda es cíclica y hace más segura la disponibilidad de frío.

Para la implementación de esta estrategia se modifica la arquitectura del circuito primario de la instalación: El bucle de producción tradicional, consistente en una batería de unidades frigoríficas en paralelo, queda transformado en una batería de menor potencia complementada por un almacenamiento conectable en serie o en paralelo y con plena flexibilidad de funcionamiento. De esta manera el primario se enriquece para transformarse en un verdadero subsistema denominado "Polo de energía primario". En dicho polo de energía se integran todas las fuentes de producción de frío que pueden alimentar el almacenamiento y/o la carga: residuales, freecooling, plantas tradicionales, etc.

4.4.1.2.2. Beneficios de los sistemas de almacenamiento de calor latente basados en materiales de cambio de fase

- Conservan energía.
- Reducen los costos de (HVAC) sistemas de calefacción y aire acondicionado
- Estabiliza la carga de energía requerida para demandas "pico"
- Promueven una comunidad segura con el medio ambiente
- Provee protección térmica portable
- Reduce los niveles de ruido generado por equipos y maquinarias
- Provee protección térmica portable
- Maximiza la utilización de energía renovable
- Reduce el uso de combustibles fósiles

Una innovación para el almacenamiento de energía térmica y control de temperatura

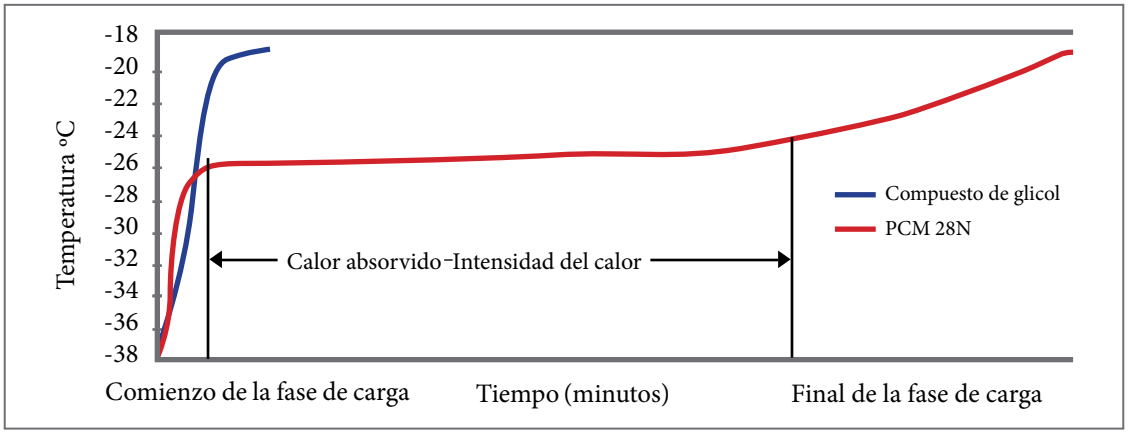


Figura 45: almacenamiento energía térmica y control de temperatura.

- **El proceso para el almacenamiento de calor latente**

La energía liberada o absorbida por una sustancia durante un cambio de fase es llamada "Energía Latente". Los materiales de cambio de fase (PCM) almacenan y liberan energía térmica durante el proceso de fusión y congelación, mientras se mantiene una temperatura constante. Esta propiedad de los materiales de cambio de fase (PCM), activan el almacenamiento de energía térmica y el control de temperatura. El cambio de fase más común se da entre sólidos y líquidos. Cuando un material de cambio de fase es sometido a calor, el material empieza a fusionarse una vez su temperatura de cambio de fase ha sido alcanzada. Aunque más

calor sea aplicado, la temperatura del material no se incrementa hasta que se alcanza la completa fusión.

Solo entonces la temperatura se vuelve a incrementar. El proceso de almacenamiento de calor latente en un material de cambio de fase es utilizado para el control de temperatura y el almacenamiento de energía latente. Comparativamente, el más simple y económico de los materiales de cambio de fase es el agua / hielo. Un número significativo de materiales de cambio de fase han sido desarrollados para congelar y derretir el agua / hielo, pero a temperaturas desde los -35°C hasta los 90°C.

Los materiales de cambio de fase tales como los paquetes de hielo (ice packs), paquetes de enfriamiento (cool packs) y paquetes calientes (warm packs) han revolucionado el envío y manejo de embalajes con control de temperatura entregando una temperatura de operación con una alta estabilidad y reusabilidad dentro de empaques que no están aislados.

Los materiales de cambio de fase en su utilización como elementos de almacenamiento de energía han sido discutidos ampliamente como una opción en el ahorro de energía. Estos materiales son capaces de guardar esta energía para usos posteriores acercando los conceptos de disponibilidad de energía a costos menores y de acuerdo a la demanda de energía. El almacenamiento de energía puede ser empleado para balancear la demanda de energía entre el día y la noche; el dimensionamiento del equipo adecuado para una demanda promedio de energía en lugar de demandas "pico" de energía, reduciendo considerablemente costos energéticos.

4.4.2. Almacenamiento en estanques solares

Un estanque común con agua es capaz de captar una gran cantidad de energía solar a través de todos los días del año. Sin embargo, la temperatura del agua permanece baja debido a que también hay grandes pérdidas de energía por radiación, convección y evaporación principalmente. Una manera de evitar esas pérdidas de calor es mediante el uso de estanques con agua salada. Debido al aumento en la densidad del agua por efecto de las sales disueltas, no se da el efecto de la convección dentro del estanque y además esto permite que se desarrolle un gradiente de temperatura estable y positiva hacia abajo. De esta forma, la temperatura del fondo es mayor que la que se tiene en la superficie y por la tanto se evita la mayor parte de las pérdidas de calor que se dan en la superficie del líquido.



Figura 46: estanque solar.

Otros aspectos que ayudan a que esto suceda, es que el agua -con sales o sin sales disueltas- no es buena conductora térmica y además es opaca a la radiación infrarroja. También, permite que la fracción visible y ultravioleta de la radiación solar penetre hasta el fondo del estanque y ahí se quede almacenada. La captación de energía solar se puede mejorar si el fondo y paredes están pintadas de negro. La remoción del calor se hace mediante intercambiadores de calor apropiados, para evitar que la solución tenga movimiento y por lo tanto se pierda el gradiente de temperatura positivo. Otro factor que puede contribuir a que se pierda dicho gradiente es el viento que pega en la superficie del líquido. Esto se puede evitar colocando una cubierta transparente adecuada sobre el estanque solar.

La absorción de la radiación de longitud de onda larga debe tomarse en cuenta debido a que el 27% de la radiación en el espectro solar total es absorbida en el primer centímetro de la salmuera. La eficiencia de aprovechamiento, en consecuencia, está limitada a la absorción en la capa con gradientes.

Podemos decir que en un estanque solar con salmuera se distinguen tres regiones distintas, aunque difusas: Una capa de agua pura en la superficie, una intermedia donde ocurren los gradientes de densidad y una convectiva en el fondo. Esta última es lo que constituye en realidad el sistema de almacenamiento de energía, dado que tiene las mayores temperaturas y se encuentra aislada de la atmósfera por las capas superiores.

4.4.3. Generación directa de vapor para tecnología de colectores cilindro parabólicos

La generación directa de vapor (DSG, por sus siglas en inglés) podría reducir potencialmente los costes hasta un 10 % en comparación con la tecnología de sistema de generación energética solar. En un esfuerzo por hacer que la tecnología avance, un consorcio germano-español, que incluye a DLR y a Endesa, ha construido recientemente una instalación de prueba de DSG en la planta de energía en el litoral, concretamente en Carboneras, España.



Figura 47: instalación de prueba de DSG.

- **Instalación de prueba de DSG**

La instalación de Carboneras está diseñada para probar y mejorar el sistema DSG en su conjunto así como sus componentes individuales. Las funciones clave incluyen las conexiones de conductos flexibles en el sistema, que son necesarias para permitir que los colectores cilindro parabólicos giren y puedan seguir el sol, los tubos receptores y el sistema de almacenamiento.

Otro aspecto que hay que destacar es un nuevo sistema que almacena energía de manera eficiente, tanto calor sensible, donde se acumula energía a medida que aumenta la temperatura del medio de almacenamiento, como calor latente, donde se acumula energía cuando el medio de almacenamiento cambia de estado sólido a líquido.

El sistema de almacenamiento de calor latente basado en sales emplea una transición de fase a 305 ºC, la sal absorbe energía en la transición de sólida a líquida. La ventaja es su capacidad para almacenar grandes cantidades de energía en un volumen pequeño y con un cambio de temperatura mínimo. La energía en el sistema puede transferirse y absorberse de manera muy eficiente en la transición de fase a una temperatura constante.

- **El agua vence al aceite**

Una ventaja clave de utilizar DSG en colectores cilindro-parabólicos es que permite a los operadores de la planta lograr temperaturas de vapor mayores que si empleara aceite. La sustitución del aceite por agua también produce menos riesgos medioambientales y una configuración general de la planta más sencilla, menores inversiones y costes de explotación y mantenimiento, y un aumento de la eficiencia de la planta.

Sin embargo, el uso de DSG como fluido de transferencia térmica también permite a los desarrolladores disfrutar de varias ventajas claves adicionales. En primer lugar, la menor temperatura de congelación del agua en comparación con las sales fundidas, e incluso el aceite térmico, supone que el esfuerzo necesario para asegurar la protección anticongelamiento adecuada se reduzca de manera significante.

- **Son necesarios diseños de almacenamiento eficientes**

El uso de DSG en colectores cilindro parabólicos para capacidad de almacenamiento térmico supone varias implicaciones. Para empezar, como los sistemas de DSG necesitan grandes cantidades de calor para transferirse a una temperatura constante cuando el agua se evapora, los operadores deben desarrollar diseños de almacenamiento más económicos y eficientes.

En los sistemas de DSG, tiene que usarse una combinación de almacenamiento de calor sensible, para precalentamiento y supercalentamiento, y de almacenamiento de calor latente (o almacenamiento en material de cambio de fase) para la evaporación. Para el almacenamiento de calor sensible, se pueden aplicar los mismos enfoques técnicos que para otros fluidos de transferencia térmica.

El sistema de almacenamiento de calor latente que se prueba en el proyecto de demostración en Carboneras actualmente es la mayor instalación de almacenamiento de calor latente a alta temperatura. Emplea 14 toneladas de nitrato de sodio con un calor latente de 700 KWh. El calor sensible para producir vapor supercalentado proviene de un sistema de almacenamiento en hormigón, que desarrollaron de manera conjunta DLR y Ed. Züblin AG.

En el proyecto de Carboneras, se han investigado los procesos de DSG, por primera vez, de manera experimental en condiciones de funcionamiento. Esto representa un paso inestimable en el camino hacia la comercialización de plantas de energía de DSG. Como tal, es probable que la comunidad más amplia de CSP continúe viéndolo con gran interés.



Figura 48: proyecto Carboneras

4.4.4. Energía OTEC

La energía OTEC, Ocean Thermal Energy Conversion o energía oceanotermal, se basa en los principios de Jacques-Arsène d'Arsonval (científico francés del siglo XIX), quien ya visualizaba el potencial del océano como gran fuente de energía. El gran problema del rendimiento que ofrecía dicho sistema comienza a solucionarse con las actuales innovaciones y el potencial que ofrecen los mares es inmenso, tanto en energía como en agua potable.

La propuesta de Dominic Michaelis, su hijo Alex Michaelis y Trevor Cooper-Chadwick se basa en la gran diferencia térmica que ofrecen los océanos en latitudes tropicales, desde los casi 30º superficiales a menos de 5ºC en zonas profundas.

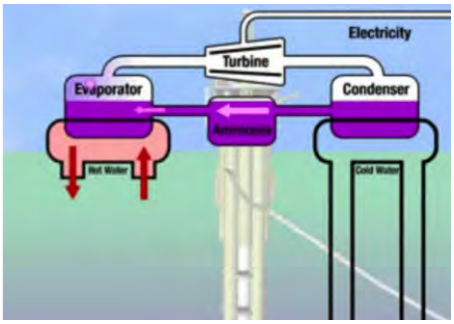


Figura 49: energía OTEC

Su funcionamiento básico es aprovechar el agua caliente de la superficie para calentar un líquido de bajo punto de ebullición (amoniaco), de esta forma conseguimos evaporarlo, así se expande

y activa una turbina de generación eléctrica. Posteriormente el líquido se enfriará en aguas profundas y se repetirá el ciclo.

4.4.5. Centrales

4.4.5.1. Horno solar de Odeillo

El horno solar de Odeillo es un centro francés de investigaciones sobre energía solar dependiente del Centre national de la recherche scientifique (CNRS) que está situado en la comuna de Font-Romeu-Odeillo-Via, en el departamento de los Pirineos Orientales, al sur del país.
El horno solar de Odeillo es, junto al que existe en Taskent (Uzbekistán), uno de los dos mayores hornos solares del mundo, con una potencia térmica de 1000 kW y debe su renombre mundial a su especialización en investigación de la concentración de la radiación solar y del comportamiento de los materiales sometidos a condiciones de temperatura extremas.



Figura 50: alzado Edificio Horno Solar.

- **Historia**

El físico francés Félix Trombe y su equipo realizaron en Meudon, en 1946, una primera experiencia con ayuda de un espejo de Defensa antiaérea para mostrar la posibilidad de alcanzar altas temperaturas muy rápidamente y en un medio ambiente muy puro, gracias a la luz solar muy concentrada. El objetivo consistía en fundir minerales y poder extraer así materiales muy puros para hacerlos con una fuente de calor muy potente.

Para probar las distintas posibilidades, se construyó un primer horno solar en Mont-Louis en 1949. Algunos años después, partiendo del modelo de este horno solar teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se construyó el horno solar de tamaño casi industrial en Odeillo. Los trabajos de la construcción del Gran Horno Solar de Odeillo duraron 6 años, de 1962 a 1968, poniéndose en funcionamiento definitivamente en 1970.

Contando con el apoyo de diversos partidarios de la energía solar, y tras la primera crisis mundial del petróleo de 1973, los investigadores del horno solar de Odeillo orientaron aún más sus trabajos hacia la conversión de la energía solar en electricidad. Estos trabajos participaron en el estudio y viabilidad de una central solar térmica que finalizaron con la construcción de la central THEMIS, que funcionó de 1982 a 1986.

El cierre de THEMIS significó el fin de las investigaciones sobre la conversión de la energía solar en electricidad. El laboratorio del Gran Horno Solar de Odeillo centró entonces su actividad sobre el estudio de los materiales y la puesta a punto métodos industriales, pasando a denominarse Institut des Matériaux et Procédés (Instituto de los Materiales y Métodos).
Al reaparecer de nuevo las preocupaciones energéticas y medioambientales mundiales, el laboratorio se implica de nuevo en la búsqueda de soluciones relativa a la energía y el medio ambiente sin rechazar sus

únicas competencias en el ámbito de los materiales y métodos. Procédés Matériaux et Énergie Solaire, PROMES, (Métodos Materiales y Energía Solar), es el nombre actual, investigando sobre materiales, sobre distintos sistemas de producción de electricidad, varios métodos de extracción de hidrógeno por vía solar y sobre distintos métodos de recuperaciones de residuos (incluido radioactivos).

- **Funcionamiento**

Principio físico de la concentración de los rayos por espejos reflectantes. Una primera serie de filas de espejos orientables y situados sobre una ligera cuesta, recogen los rayos solares y los transmiten hacia una segunda serie de espejos "concentradores" que forman la enorme parábola en el edificio principal. Los rayos convergen a continuación hacia la zona superior del edificio central que los concentra sobre un objetivo (target), una superficie circular de 40 cm de diámetro. Esto equivale a concentrar la energía de "10.000 soles".

- **Ventajas**
  - Se obtienen rápidamente temperaturas considerables (más de 3000° C).
  - La energía es gratuita.
  - Permite originar artificialmente bruscos cambios de temperatura y en consecuencia estudiar el efecto de los choques térmicos.
  - No hay casi ningún elemento que contamine ya que solamente el objeto o material a estudiar es calentado y por una radiación solar.



Figura 51: estanque solar.

- **Utilización**

El horno solar de Odeillo es un laboratorio de investigación del CNRS conjuntamente con la Universidad de Perpiñán especializado en estudios térmicos a alta temperatura, los sistemas termoportadores, la conversión de la energía, el comportamiento de los materiales a alta temperatura en medio ambiente extremo, permitiendo además hacer experimentos en un ambiente con condiciones de gran pureza química.
Los ámbitos de investigaciones se extienden también a las industrias aeronáuticas, aeroespaciales, entre varias, comprobando materiales que puedan estar sometidos a radiaciones solares más intensas al cruzar las diferentes capas atmosféricas e incluso en condiciones espaciales.

4.4.5.2. Ps10, la primera torre comercial del mundo

Este proyecto supone el lanzamiento, tras varios años de investigación y desarrollo por parte de Abengoa Solar, de la primera planta solar con tecnología de torre a escala mundial que producirá electricidad de una forma estable y comercial.
La central solar PS10, posee 30 minutos de almacenamiento y bajo condiciones de baja irradiación, la planta generará energía limpia al año capaz de alimentar a 5500 hogares y ahorrar 6700 t de CO_2 al año.



Figura 52: planta solar equipada con heliostatos.

Como se observa en su esquema de funcionamiento, que se muestra a continuación, el receptor solar genera vapor a alta temperatura que posteriormente se emplea para mover una turbina, siendo la potencia instalada de 11 MW.

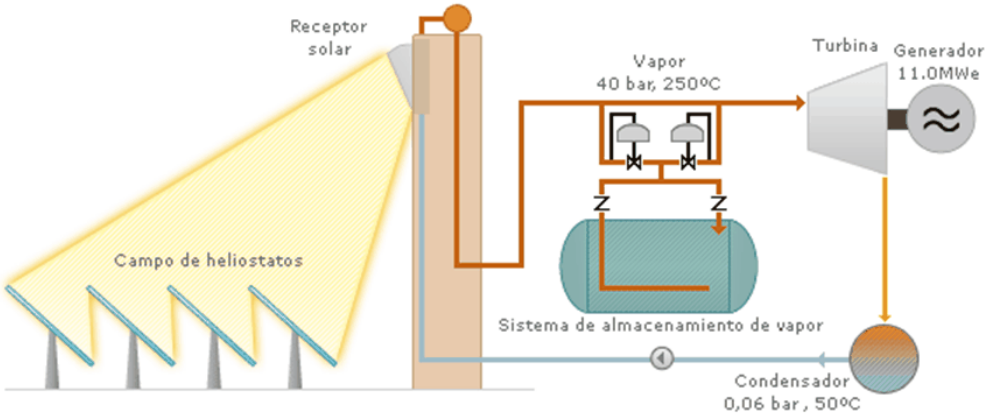


Figura 53: esquema de funcionamiento de una planta solar.

PS10 está formada por 624 helióstatos (Sanlúcar 120) diseñados por Abengoa Solar New Technologies de 120 m^2 (75 000 m^2 de área total de helióstatos) que concentran la radiación solar que reciben sobre el receptor que se sitúa en la parte superior de una torre de 115m de altura (Torre PS).
El receptor de PS10, diseñado por Abengoa Solar NT , consiste en un receptor para generación directa de vapor saturado, compuesto de cuatro paneles verticales de 5,5 m de anchura y 12 m de altura. Están dispuestos en una configuración semicilíndrica, y se alojan en una cavidad con una apertura de 11m x 11m.

En condiciones nominales de operación, el receptor de PS10 debe poder suministrar 50 MWt de vapor saturado a 257º con un rendimiento superior al 92% respecto a potencia radiante incidente.



Figura 54: sistema de ventilación/climatización.



Figura 55: depósitos de almacenamiento.

Solúcar, trendrá un funcionamiento similar a la PS10, pero con el doble de potencia, 20 MW, lo que implica una capacidad para abastecer a 12 000 hogares. Tiene 1255 heliostatos de 120 m^2, y la torre será de 160 metros.

4.4.6. Fabricantes de Acumuladores Solares

Grupo Empresarial Lapesa, Pol. Ind. Malpica, Calle A, parcela 1A, 50057 Zaragoza
www.lapesa.es

Termosun - Aaltersun Grup, Calle València 15 – 21, 08110 Montcada i Reixac
www.termosun.com

Sonnenkraft España S.L., C/. La Resina 41a, Nave 5, 28021 Madrid
www.sonnenkraft.com

Robert Bosch España S.A., Dpto. Junkers (TT/SSP), Hnos. García Noblejas, 19
28037 Madrid
www.junkers.com

PHÖNIX SonnenWärme AG, Am Treptower Park 28-30, 12435 Berlin, Alemania
www.sonnenwaermeag.de

Solvis GmbH & Co. KG, Grotian-Stein-Strasse 12, 38122 Braunschweig, Alemania
www.solvis.de

Stiebel Eltron GmbH & Co.KG, Dr.-Stiebel Strasse, 37603 Holzminden, Alemania
www.stiebel-eltron.de

NAU GmbH., Naustr. 1, 85368 Moosburg, Alemania
www.nau-gmbh.de

Wikora GmbH., Friedrichstr. 9, 85568 Hermaringen, Alemania
www.wikora.de

Energietechnik GmbH., An der Bleicherei 15, 88214 Ravensburg, Alemania
www.pro-solar.de

Solarfocus GmbH., Werkstr. 1, 4451 St. Ulrich, Austria
www.solarfocus.at

Jenni Energietechnik AG, Lochbachstrasse 22, 3414 Oberburg, Suiza
www.jenni.ch

Gorenje Tiki, d.o.o., Magistrova 1, 1521 Ljubljana, Eslovenia
www.girenjetiki.si

MEGASUN - Helioakmi S.A., Nea Zoi, Aspropyrgos, 19300, Atica, Grecia
www.helioakmi.com

4.4.7. Proyectos relacionados

- **Algunos cementos podrían reparar sus propias grietas y almacenar energía de calor latente**

La investigadora Idurre Kaltzakorta ha estudiado la posibilidad de añadir al cemento capacidades como la auto-reparación de grietas y el almacenamiento de energía de calor latente. Los resultados de su estudio los ha presentado en una tesis en la Universidad del País Vasco (UPV/EHU).

El cemento y sus derivados son uno de los materiales más utilizados en la construcción, debido a sus buenas prestaciones y bajo precio. En los últimos años, una parte de la investigación científica y tecnológica se está encaminando a dotar estos materiales de funcionalidades adicionales. Concretamente, la doctora Idurre Kaltzakorta ha estudiado la posibilidad de añadir al cemento capacidades tales como la auto-reparación de grietas y el almacenamiento de energía de calor latente.

http://www.agenciasinc.es/Noticias/Algunos-cementos-podrian-reparar-sus-propias-grietas-y-almacenar-energia-de-calor-latente

- **Un sistema aprovecha la diferencia de temperatura oceánica para generar electricidad**

Ingenieros del Jet Propulsion Laboratory, que pertenece a la NASA, han aplicado un sistema de generación de energía ideado originalmente para alimentar a vehículos robóticos subacuáticos para producir energía a gran escala aprovechando las corrientes marinas. Para ello, sacan partido de la diferencia de temperatura que hay en los océanos. Esa diferencia de temperatura hace que un determinado fluido se expanda produciendo una gran presión. Esa gran presión es aprovechada, entonces, para generar energía en la costa en un planta hidroeléctrica. La gran ventaja de su sistema, según ellos, es que elimina los elementos eléctricos sumergidos, sujetos a corrosión, y que la energía hidráulica presurizada puede ser almacenada y usada para generar electricidad en función de la demanda energética.

http://www.tendencias21.net/Un-sistema-aprovecha-la-diferencia-de-temperatura-oceanica-para-generar-electricidad_a3042.html

- **La planta de energía solar más grande del mundo**

El Gobierno de Abu Dhabi anunció su sociedad con la firma francesa Total y la española Abengoa para construir la planta de concentración de energía solar más grande del mundo, cuya inversión ascenderá a 600 millones de dólares, y presentó una imagen de cómo se verá.

La planta será edificada al suroeste de Abu Dhabi, capital de Emiratos Árabes Unidos (EAU), y tendrá una capacidad de 100 MW, lo que le permitirá contar con energía renovable para suplir 7% de la necesidad de electricidad del emirato para 2020.

http://diarioecologia.com/2011/03/la-planta-de-energia-solar-mas-grande/#axzz1ST8iLVVB

- **Investigador 70 años elabora prototipo de acumulación de energía inédito**

El investigador de la facultad de Física en Ourense, Gerardo Domarco, de 70 años, elabora un prototipo de acumulador de energía novedoso, a partir de un anillo superconductor con el que constató que no se perdió ni un amperio de la corriente eléctrica introducida, lo que ya está patentado.

En una entrevista a Efe, Domarco explicó que, a pesar de estar jubilado en la docencia e investigación, sigue colaborando en el desarrollo de varios experimentos que dieron lugar a once patentes de la facultad orensana, y otra que permitirá desarrollar un acumulador de energía inédito, a raíz de una patente lograda hace un mes.

http://www.adn.es/local/vigo/20081130/NWS-0225-Investigador-acumulador-prototipo-energia-elabora.html

- **Dinamarca: Isla artificial para almacenar energía renovable**

En medio de otros tantos proyectos verdes, Dinamarca pretende dar un fuerte impulso a las energías renovables para, en un futuro no muy lejano, dejar de depender de los combustibles fósiles y evitar así la contaminación. En esta oportunidad, el país está buscando garantizar la producción eólica y solar a través de una Isla de Energía Verde, donde se generaría batería para hacer funcionar los molinos de viento y, los paneles fotovoltaicos aun cuando las condiciones climáticas no lo permitan.

http://www.tuverde.com/2011/07/dinamarca-proyectan-una-isla-artificial-para-almacenar-energia-renovable/

- **Isla de energía para extraer del mar energía renovable e ilimitada**

El ingeniero Dominic Michaels ha ideado una "Isla de Energía" para extraer del mar fuentes de energía renovables. El diseño se compondría de una planta de conversión de energía termal junto a turbinas eólicas, paneles solares y turbinas acuáticas, que apoyarían el funcionamiento de la primera. La planta de conversión de energía explota la diferencia de temperatura que hay entre la superficie oceánica y el agua que está en las profundidades para hacer funcionar turbinas de vapor que generarían la electricidad. Estas Islas de Energía, de 600 metros de largo y que necesitarían un inversión de 600 millones de dólares, también funcionarían como plantas desaladoras.

http://www.tendencias21.net/Idean-una-Isla-de-Energia-para-extraer-del-mar-energia-renovable-e-ilimitada_a2754.html

http://blogtecnologos.wordpress.com/2011/02/11/islas-de-energia/

4.4.8. Bibliografía almacenamiento térmico

- http://es.wikipedia.org/wiki/Calor_sensible
- http://www.caloryfrio.com/feria-climatizacion-2011/ponencias-foro-clima/almacenamiento-energia-termica-cambio-fase-ahorro-climatizacion.html
- http://www.rgees.com/esp/technology.php
- http://www.quimica.urv.es/~w3siiq/DALUMNES/99/siiq51/ema.html
- http://es.csptoday.com/industry-insight/generaci%C3%B3n-directa-de-vapor-para-tecnolog%C3%AD-de-colectores-cilindro-parab%C3%B3licos-%C2%BFqu%C3%A9-
- http://blogtecnologos.wordpress.com/2011/02/11/islas-de-energia/
- http://es.wikipedia.org/wiki/Horno_solar_de_Odeillo
- http://www.abengoasolar.com/corp/web/es/nuestros_proyectos/plataforma_solucar/ps10/index.html

5

COMPARACIÓN DE LOS SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO, GRADO DE DESARROLLO DE LOS MISMOS Y COSTES



Se puede considerar como más madura, las tecnologías de bombeo hidráulico, aunque se están desarrollando sistemas de demostración que combinan el bombeo con la generación a partir de fuentes renovables no gestionables, lo que nos haría señalar otro rango de desarrollo aún en progreso. Señalar también que las tecnologías de baterías y volantes de inercia están muy maduras. En cuanto al resto ya se encuentran operativas algunas instalaciones de aire comprimido aunque ninguna de ellas está basada en el aprovechamiento de energías renovables. En los puestos más retrasados podemos mencionar los condensadores y los superconductores con algunas plantas de demostración ya en funcionamiento pero lejos de ser introducidas en el mercado.

En la siguiente tabla se muestran las características de potencia, tiempo de descarga, eficiencia y vida media útil de los distintos sistemas de almacenamiento de energía eléctrica descritos:

	Potencia	Descarga	Eficiencia	Vida media
Ion- Li	5 MW	15 min - varias horas	90 (DC)	15 años
Pb-ácido	3-20 MW	10 sec - varias horas	75 - 80 (DC) 70 - 75 (AC)	4 - 8 años
NaS	35 MW	8 h	80 - 85 (DC)	15 años
Vanadio redox	4 MW	4 - 8 h	75 - 80 (DC) 63 - 68 (AC)	10 años
Zn - aire	20 kW - 10 MW	3 - 4 h	40 - 60	Unos cientos de ciclos
CAES (100 - 300 MW bajo tierra)	15 - 400 MW	2 - 24 h	76	35 años
Bombeo	250 MW <1 GW	12 h	87	30 años
SMES	1 - 3 MW	1 - 3 sec	90	> 30.000 ciclos
Volantes de inercia	750 - 1650 kW	15 sec - 15 min	93	20 años
Supercondensadores	10 MW	< 30 sec	90	> 500.000 ciclos

Tabla 15: características de potencia, tiempo de descarga, eficiencia y vida útil de sistemas de almacenamiento de energía eléctrica.

A continuación se muestra el grado desarrollo de las distintas tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica:

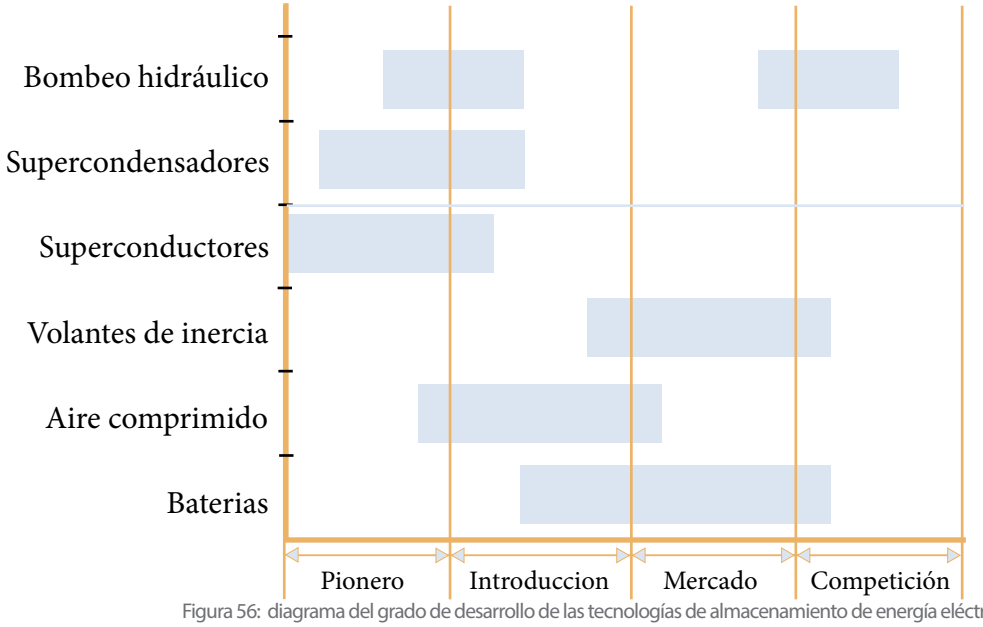


Figura 56: diagrama del grado de desarrollo de las tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica.

En la siguiente figura se muestra una visión inicial de los costes en función de los requerimientos de potencia y de energía solamente excluyendo los costes de la electrónica de conversión de potencia.

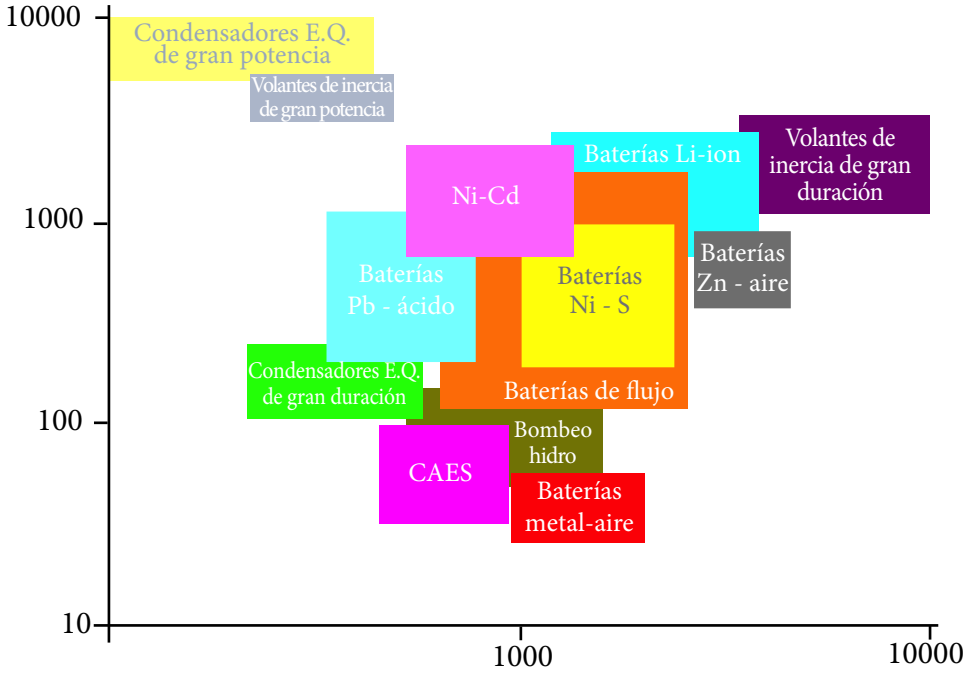


Figura 57: diagrama de los costes en función de los requerimientos de potencia y energía.

En la siguiente tabla se muestra el cálculo de coste de inversión por ciclo:

$$\frac{\text{Capital} \,/\, \text{Energía}}{\text{Ciclos x eficiencia}}$$

A lo que habría añadir si se quiere un estudio más completo, los costes de operación y mantenimiento, desmantelamiento, reemplazo, etc.

	Costes de recarga (¢USD/kWh)		Costes de recarga (¢USD/kWh)
Zinc - aire	70 - 100	Vanadio redox	5 - 80
Pb - aire	20 - 100	Volantes de inercia de gran duración	3 - 25
Ni - Cd	18 - 100	Supercondensadores electroquímicos	2 - 28
Ion - Li	15 - 100	CAES + gas	2 - 5
NaS	9 - 30	Bombeo	0,1 - 1,8

Tabla 16: coste de recarga.

Teniendo en cuenta la existencia de estudios rigurosos que han planteado el coste anual de almacenamiento de energía eléctrica en función del tipo de demanda que se pretende cubrir se pueden considerar tres casos diferenciados:

5.1. Almacenamiento para proveer energía de base al sistema eléctrico con una estimación de suministro de 8 horas.

5.2. Sistema de almacenamiento distribuido con una estimación de suministro de 4 horas.

5.3. Sistemas para mejorar la calidad de la potencia servida por la red eléctrica con una estimación de suministro de 20 segundos.

Los costes analizados han sido desagregados considerando tanto la financiación del capital invertido como los costes de compra de combustible y electricidad, así como los de reemplazo, operación y mantenimiento.

5.1. Almacenamiento para proveer energía de base al sistema eléctrico con una estimación de suministro de 8 horas

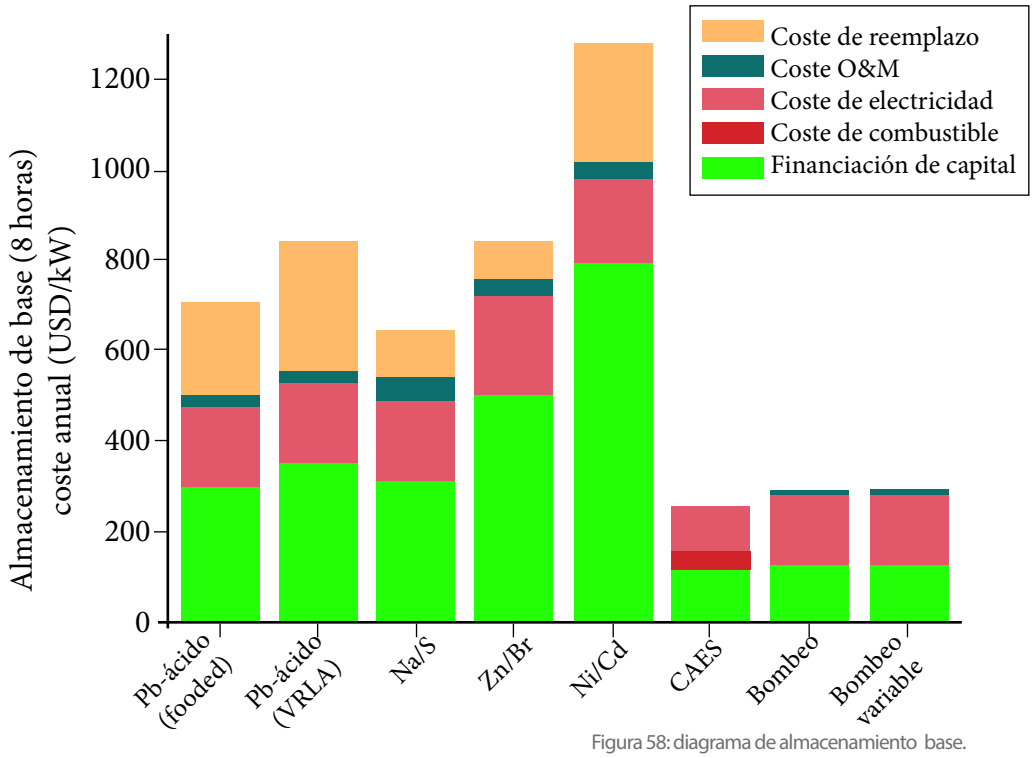


Figura 58: diagrama de almacenamiento base.

Se puede observar que cuando el almacenamiento se destina al aporte energético de base al sistema eléctrico, y no existiendo disponibilidad de almacenamiento de aire comprimido, la mejor opción es el bombeo a velocidad variable. Frente a esto, todas las tecnologías de batería son sustancialmente más caras.

5.2. Sistema de almacenamiento distribuido con una estimación de suministro de 4 horas

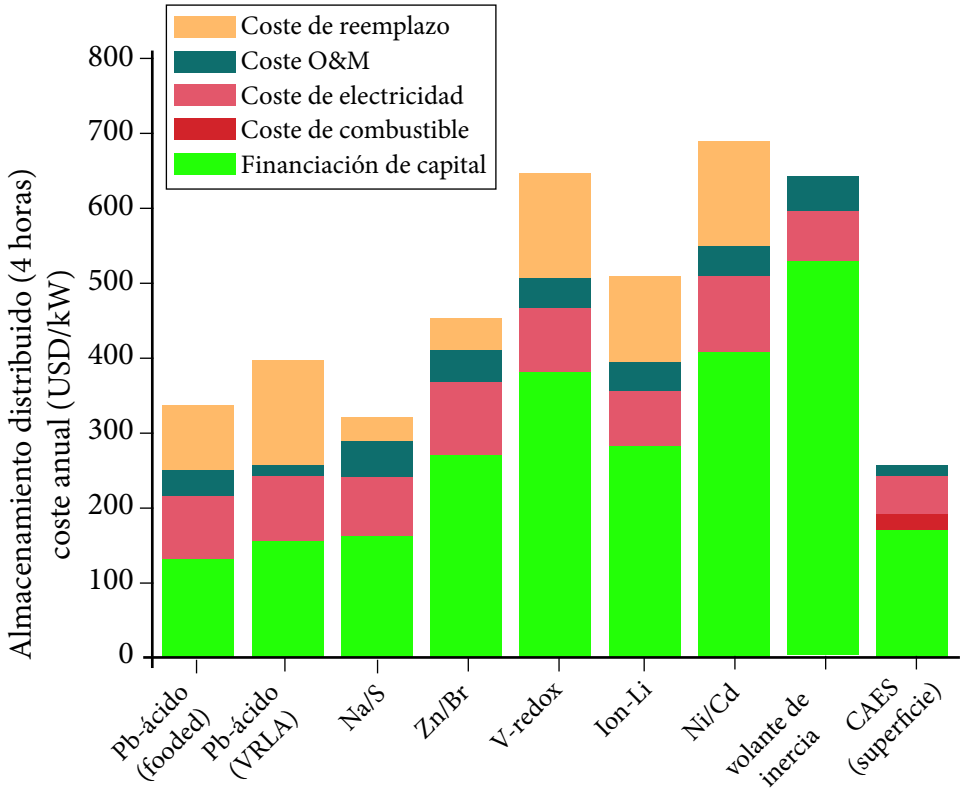


Figura 59: diagrama sistema de almacenamiento distribuido

En el caso de necesitar tecnología de almacenamiento distribuido (situación en la que el bombeo no es factible), la tecnología de almacenamiento de aire comprimido resulta menos costosa, existiendo tecnologías de batería que resultan también atractivas.

5.3. Sistemas para mejorar la calidad de la potencia servida por la red eléctrica con una estimación de suministro de 20 segundos.

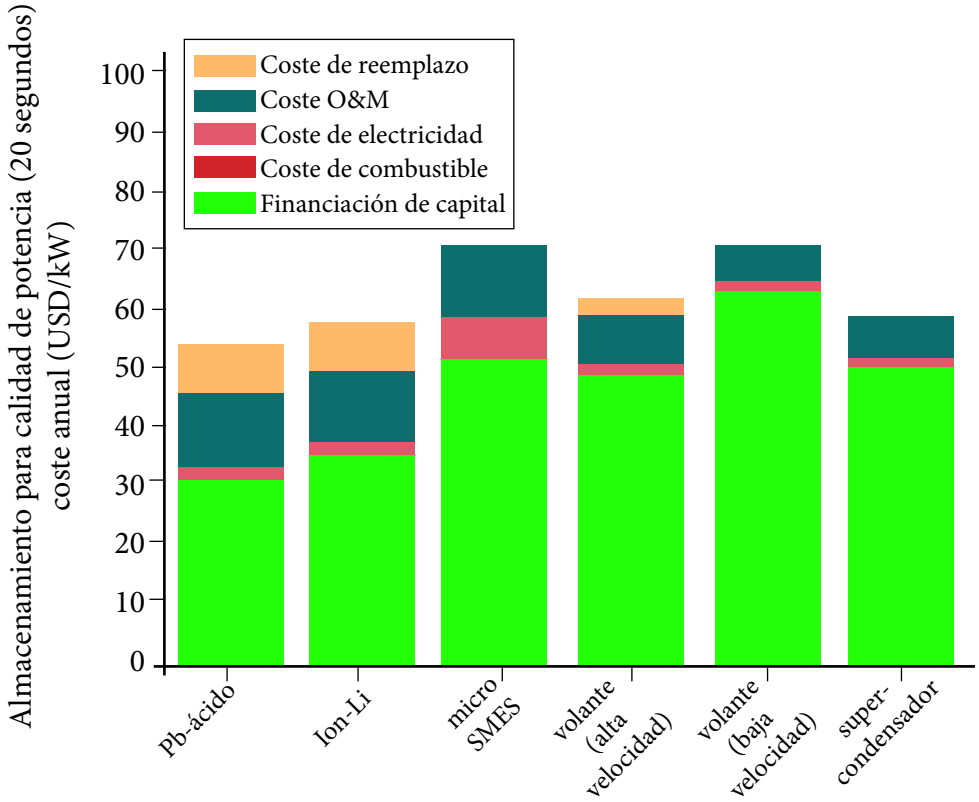


Figura 60: diagrama optimización sistema de almacenamiento

Finalmente, cuando los sistemas de almacenamiento sólo se pretenden utilizar para mejorar la calidad de la potencia, con aportaciones de energía eléctrica a la red de forma rápida pero durante espacios de tiempo reducidos, son las baterías las que resultan más atractivas en términos de costes.

En cuanto a los costes de operación y mantenimiento en sistemas de almacenamiento, cada tecnología tiene valores muy característicos, los cuales deben ser tenidos en cuenta también en el momento de elegir la tecnología más adecuada a cada requerimiento. Así, los volantes de inercia tienen unas probabilidades de fallo muy bajas, por lo que los costes de operación y mantenimiento pueden considerarse prácticamente nulos, siendo habitual la sustitución de rodamientos cada 5 años y de la bomba de vacío cada 7 años. En los sistemas con superconductores los costes de operación y mantenimiento conforman un 20% del coste total anual de la planta.



6

SOFTWARES RELACIONADOS



Seguidamente se efectuará una breve mención del softaware disponible para la evaluación de sistemas de almacenamiento energético.

- **Simulink**

Basado en el mismo comportamiento del Matlab, utilizado para la simulación de sistemas híbridos

- **Grhyso**

Simula, evalúa económicamente y optimiza sistemas de generación de energía eléctrica en sistemas conectados a la red eléctrica (parques eólicos, huertas solares, sistemas mixtos, etc.)

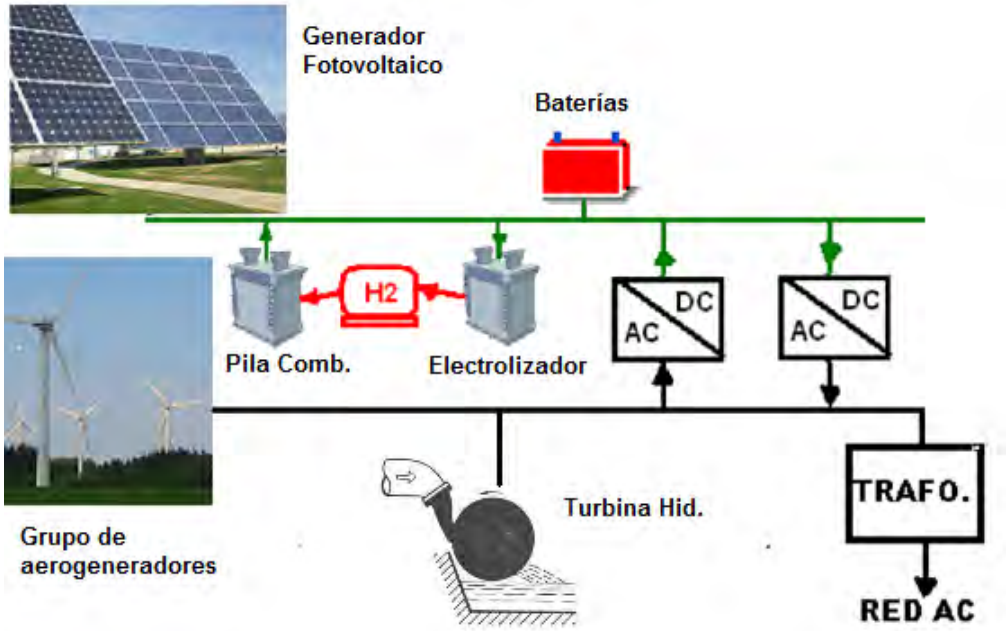


Figura 61: esquema de sistemas de almacenamiento energético.

- **Hoga**

Simula, evalúa económicamente y optimiza sistemas de generación de energía eléctrica en sistemas aislados de la red eléctrica.

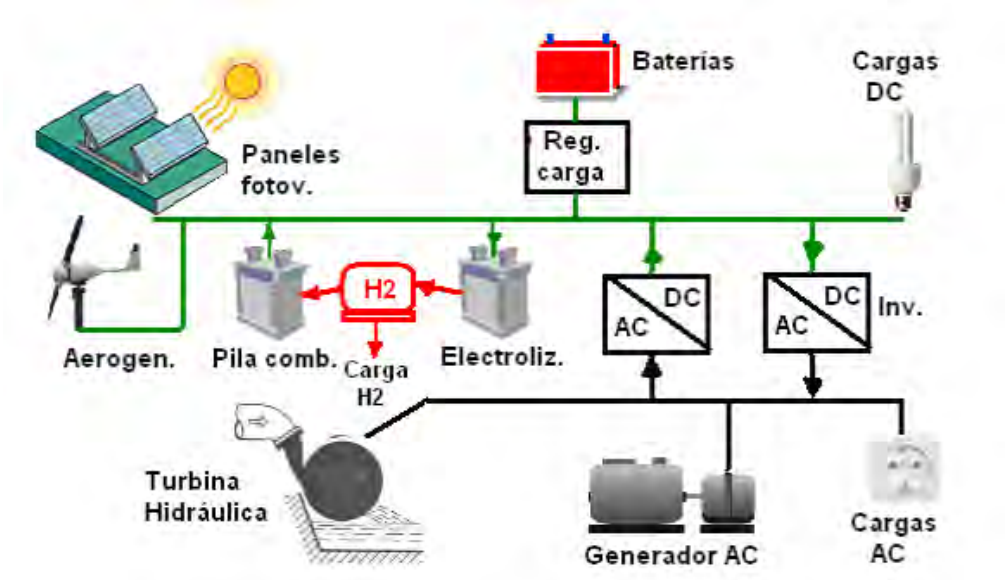


Figura 62: esquema de sistemas aislados de la red eléctrica.

TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO ENERGÉTICO

© ZONA EÓLICA CANARIA S.A.
Calle Veintinueve de Abril, Nº 30 Bajo
T.M. de Las Palmas de Gran Canaria
35007 – Las Palmas
España
ISBN-13: 978-84-617-4362-9

2016




9 788461 743629