ANEXO IV

DESCRIPCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN Y ALMACENAMIENTO



Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Comparación de Sistemas de Baterías por su Potencia y Energía Almacenada. 89
Tabla 2: Comparación de Tecnologías de Almacenamiento. 90
Tabla 3: Comparación de Baterías por Tecnología 91
Tabla 4: Aplicaciones de los Almacenamientos de Energía 92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Principio de operación de una central hidroeléctrica 6
Figura 2: Central hidroeléctrica con turbina tipo tornillo de Arquímedes 7
Figura 3: Modelo de generación hídrica para ríos y canales de poca diferencia de altura 8
Figura 4: Rueda de agua Breadtshot en Verolengo, Italia y su modelo el laboratorio 9
Figura 5: Vista de la turbina ensamblada, medidor de torque en línea y generador de inducción 10
Figura 6: Central nuclear con reactor de agua presurizada 14
Figura 7: Central nuclear con reactor de agua hirviendo 15
Figura 8: Central nuclear con reactor de agua pesada 16
Figura 9: Paneles Fotovoltaicos. 18
Figura 10: Modelo panel Solar Sunflower 19
Figura 11: Sistema de paneles fotovoltaicos flotantes 20
Figura 12: Células solar incrustada en carretera 21
Figura 13: Esquema gráfico de una celda fotovoltaica 22
Figura 14: Proyecto Termosolar 23
Figura 15: Sistema de Concentración Solar utilizando espejos 24
Figura 16 : Central de concentración solar con reflectores Fresnel 25
Figura 17: Ejemplo de reflectores Fresnel 25
Figura 18 : Central de concentración solar con torre solar 26
Figura 19: Central de concentración solar con discos solares 27
Figura 20: Ejemplo de Sistema de Generación Solar Espacial. 28
Figura 21: Funcionamiento de colector solar inflable 29
Figura 22: Diseño HELIOtube de la empresa Heliovis 29
Figura 23: Recubrimientos solares para ventana (luminiscente) 30
Figura 24: Parque eólico con turbinas de viento de eje horizontal 31
Figura 25 : Resumen de diferentes fundaciones fijas disponibles para turbinas de viento en alta mar 32
Figura 26: Componentes de transmisión de eólica marina 33
Figura 27: Modelos de turbinas de viento de eje vertical 34
Figura 28 : Prototipo de una turbina de viento flotante 35
Figura 29: Representación de modelo de turbina de viento sin aspas 36
Figura 30: Sistema de turbina aerotransportada 37
Figura 31: Turbina Canalizada SHEERWIND INVELOX 38
Figura 32: Clasificación de técnicas de generación de energía Undimotriz 39
Figura 33 : Convertidores de energía Undimotriz por desbordamiento 40

Figura 34: Convertidores de energía undimotriz con cuerpos oscilantes 41
Figura 35: Convertidores de energía Undimotriz con columnas de agua oscilantes.. 41
Figura 36 : Esquema de una central mareomotriz con generación unidireccional 42
Figura 37: Turbinas de instalación subterránea 43
Figura 38: Ciclo operativo de una central maremotérmica 44
Figura 39: Ciclo operativo de una central osmótica por presión invertida..... 46
Figura 40: Diagrama Lineal de temperatura de agua y vapor geotérmico recomendado para diversas aplicaciones 48
Figura 41: Usos directos del recurso geotérmico: Rangos de temperatura de algunos procesos industriales y aplicaciones agrícolas 49
Figura 42: Central geotérmica accionada por vapor seco..... 50
Figura 43 : Central geotérmica accionada por destello de vapor de una etapa 52
Figura 44 : Central geotérmica de ciclo binario de una etapa 54
Figura 45: Baldosa piezoeléctrica Pavegen 55
Figura 46 : Capacidad Global de almacenamiento de Energía por Uso y Tecnología. 57
Figura 47 : Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica 58
Figura 48: Curva de madurez de tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica 58
Figura 49: Gráfico de Comparación de Tiempos de Descarga por Tecnología 59
Figura 50: Comparación mediante densidades de energía y potencia por Tecnología 59
Figura 51: Central Hidroeléctrica con Bombeo de agua dulce Rocky Mountain (1095 MW), ubicada en el estado de Georgia, Estados Unidos. 61
Figura 52: Central con almacenamiento por compresión diabática de aire. 62
Figura 53: Central con almacenamiento por compresión adiabática de aire. 63
Figura 54 : Sistema de almacenamiento de energía por compresión submarina de aire. 64
Figura 55 : Almacenamiento de Aire comprimido Isotérmico de la Compañía SustainX 65
Figura 56: Volante de inercia de cuarta generación. 66
Figura 57: Sistema de Almacenamiento de 20MW ubicado en Abu Dhabi. 67
Figura 58: Interior de un módulo de baterías (izquierda) y módulo inversor (derecha). 67
Figura 59: Estructura interna de una batería de plomo ácido 68
Figura 60: Banco de baterías de plomo ácido 68
Figura 61 : Banco de baterías de níquel cadmio..... 69
Figura 62: Funcionamiento de Batería de Ion Litio. 70
Figura 63 : Batería de zinc aire 71
Figura 64 : Principio de funcionamiento de una batería de litio aire..... 72
Figura 65: Estructura de una celda de NaS. 73
Figura 66: Batería de Titanato de Litio con encapsulado tipo botella. 74
Figura 67: Componentes de una batería de flujo tipo redox. 76
Figura 68: Ciclo operativo de un sistema de almacenamiento con hidrógeno. 78
Figura 69: Central de almacenamiento de hidrógeno en Noruega. 78
Figura 70: Centro de carga para vehículos con celdas de hidrógeno. 79

Figura 71: Concepto global del uso de hidrógeno y gas natural sintético como portadores de energía 80
Figura 72: Ejemplo de Supercondensadores. 81
Figura 73: Ciclo de carga y descarga de un supercapacitor. 82
Figura 74: Almacenamiento de energía aprovechando el fenómeno de superconductividad 83
Figura 75: Esquema de Sistema de Almacenamiento de Calor Sensible. 85
Figura 76: Principio de funcionamiento de materiales de cambio de fase. 86
Figura 77: Principio de funcionamiento de materiales de cambio de fase. 87
Figura 78: Comparación de tecnologías de almacenamiento de energía: potencia nominal, energía y tiempo de descarga 88
Figura 79: Tiempo de descarga según aplicación en la Red Eléctrica. 93
Figura 80: Generación de Energía Renovable y Almacenamiento en Rampa 94
Figura 81: Curva de Duración de la Demanda 95
Figura 82: Curva de duración de la demanda eléctrica de Panamá 2024 96
Figura 83: Ejemplo de aplicaciones de los Sistemas de Almacenamiento en la Red Eléctrica. 101
Figura 84: Aspectos considerados en un Análisis de Ciclo de Vida para un recurso energético 104
Figura 85: Huellas de Carbono de diferentes tecnologías de Generación 105

ANEXO V

DESCRIPCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN Y ALMACENAMIENTO

Una revisión del estado del arte actual sobre las diferentes tecnologías en la generación y almacenamiento de energía eléctrica es presentada en este capítulo; también se hace mención a los impactos ambientales que causan dichas tecnologías.

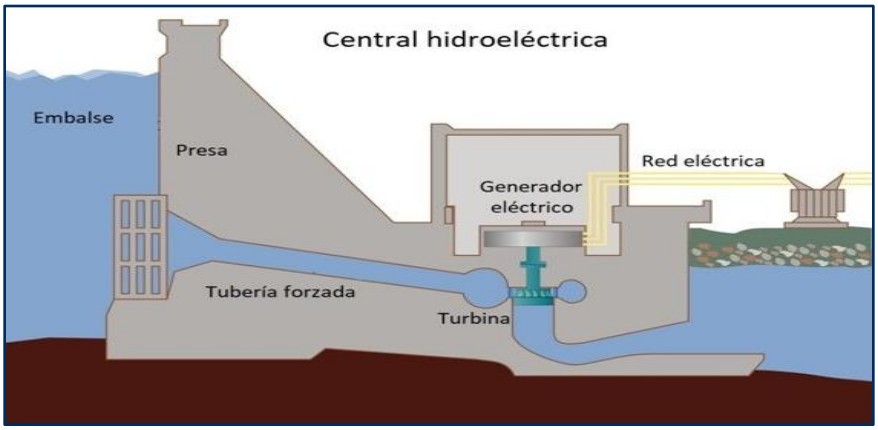
Tecnologías de Generación de Energía Eléctrica

HIDROELÉCTRICA

La energía hidráulica o hídrica, aprovecha la energía cinética y potencial de los saltos, las mareas y las corrientes de agua. Se conoce como central hidroeléctrica a la infraestructura que utiliza la energía hidráulica para generar energía eléctrica (Pérez Porto, 2014). Dependiendo de las características de cada sitio, caída, caudal, si existe embalse o si es a filo de agua, existen distintos tipos de turbinas apropiadas para cada escenario.

Su funcionamiento está basado en un salto de agua que genera dos niveles de un cauce: cuando el agua cae del nivel superior al inferior, pasa por una turbina hidráulica que transmite la energía a un generador y la transformar en energía eléctrica (Pérez Porto, 2014). En la Figura 1 se explica el funcionamiento de una central hidroeléctrica.

Figura 1: Principio de operación de una central hidroeléctrica

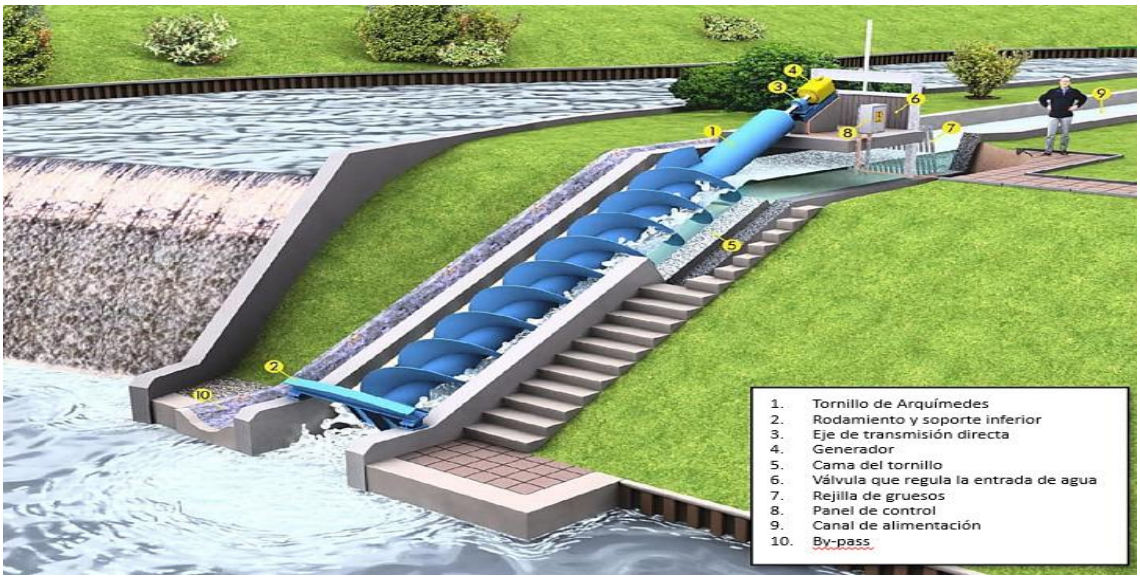


Referencia: (Ingeoexpert, 2018).

Recientemente se han diseñado e implementado turbinas hidráulicas de baja presión para aprovechar la energía potencial de aguas en ríos no muy caudalosos y con bajas cabezas hidráulicas (usualmente menores a 10 metros). Las turbinas se asemejan y funcionan con el principio del tornillo de Arquímedes: el agua ingresa al tornillo y mientras hace su recorrido su peso mueve los álabes e impulsa la turbina. En la parte inferior del tornillo el agua es desfogada, mientras que en la parte superior se encuentra la caja de cambios y el generador eléctrico. En la Figura 2 se puede observar en funcionamiento esta turbina.

La principal ventaja de este diseño es que esta tecnología puede implementarse para generación distribuida sin afectar considerablemente la fauna y el ecosistema. Los peces pueden navegar por las turbinas sin ninguna complicación ya que las velocidades de estas son relativamente bajas. Además de esto, debido a que las cabezas de agua y caudales son relativamente bajos, no es requerido crear ninguna represa.

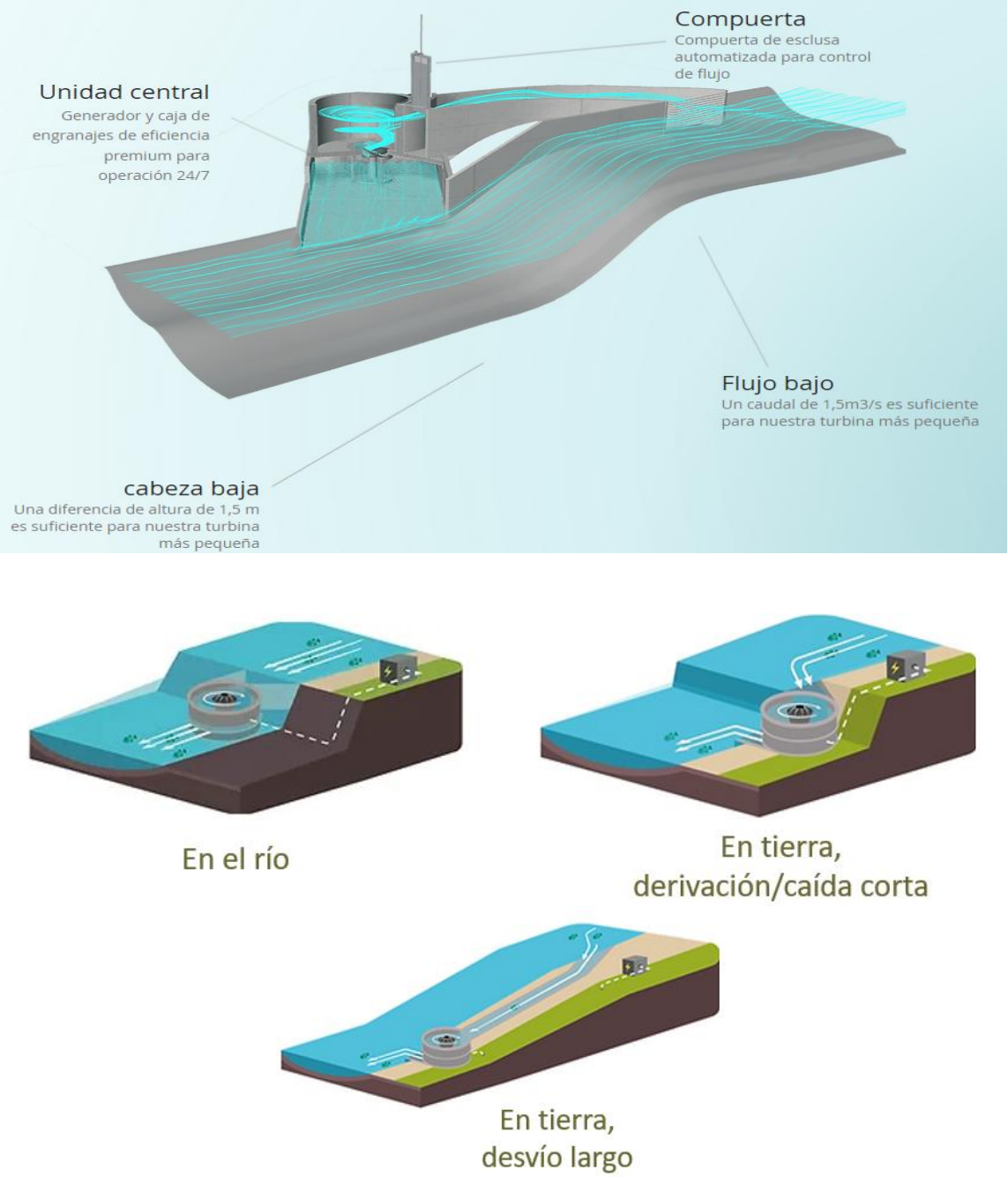
Figura 2: Central hidroeléctrica con turbina tipo tornillo de Arquímedes



Referencia: (Aqua Helica, s.f.).

Por esta misma línea, se puede aplicar la misma idea sin represar el agua del cauce de un cuerpo de agua, realizando una instalación más puntualizada desviando parte del cauce para que pase por una turbina y se regrese al canal principal, estos diseños son más puntualizados y pequeños, pero pueden realizarse a lo largo de un cuerpo de agua sin tener que represar el agua, evitando que el pasaje de los peces se vea afectado, mejorando el modelo amigable evitando la posible migración de estos por la presencia de la presa, se puede observar un ejemplo de esto en la Figura 3.

Figura 3: Modelo de generación hídrica para ríos y canales de poca diferencia de altura



Referencia: (Turbulent, 2022)

La eficiencia hidráulica máxima de las máquinas de gravedad puede superar el 80%, pero los valores típicos de la eficiencia global oscilan entre el 50% y el 70%. Por otro lado, las ruedas hidráulicas operan según las diferencias de altura y el caudal máximo por metro de ancho. El costo de las ruedas hidráulicas es del 33% al 60% del de las turbinas Kaplan y más bajo que el de los tornillos hidrodinámicos. Las ruedas hidráulicas son ventajosas cuando es posible renovar las estructuras civiles existentes, como los antiguos molinos de agua, convirtiéndose en lugares atractivos educativos, turísticos y recreativos. El sistema de toma de fuerza (PTO) es un aspecto importante para mejorar. La velocidad de rotación de las ruedas hidráulicas es generalmente baja y requiere una caja de cambios que coincida con la frecuencia del generador. Esto da como resultado una toma de fuerza muy cara. Se han realizado trabajos preliminares para superar este déficit, probando un nuevo sistema de transmisión, ya que los generadores de imanes permanentes podrían utilizarse en estas situaciones, pero requieren una electrónica de potencia razonablemente compleja. Un enfoque adicional probó el uso de estructuras de flujo de entrada ajustables que se pueden gestionar en función del caudal. Ya se han realizado algunos estudios para ruedas de agua por gravedad (Kougias, 2019). En Figura 4 se observa una rueda de agua Breadtshot en Verolengo, Italia y su modelo del laboratorio.

Figura 4: Rueda de agua Breadtshot en Verolengo, Italia y su modelo en laboratorio



Referencia: (Kougias, 2019)

Bombas como turbinas

Las bombas como turbinas (PAT) son bombas hidráulicas que funcionan en modo inverso como turbinas, por lo que producen energía en lugar de consumirla mediante un motor de inducción conectado que funciona como generador. En la Figura 5 se muestra un PAT centrífugo estándar vinculado a un medidor de par y un generador de inducción. Las bombas hidráulicas se fabrican en masa a nivel mundial y las principales ventajas de su aplicación como turbinas incluyen dimensiones compactas, tiempo de entrega corto, fácil mantenimiento y disponibilidad de repuestos, y costos de instalación reducidos (Kougias, 2019).

Figura 5: Vista de la turbina ensamblada, medidor de torque en línea y generador de inducción



Referencia: (Kougias, 2019)

TERMOELÉCTRICAS

Las centrales termoeléctricas involucran el aprovechamiento de la energía térmica producto de la combustión de una fuente de energía o insumo para la generación de energía eléctrica. La gran mayoría de las fuentes de energía usadas son de origen fósil, aunque recientemente se ha estado incursionando en el uso de desechos de materias orgánicas. En centrales de carbón, el contenido energético de diferentes fuentes de carbón es aprovechado en las calderas para producir vapor y utilizar el ciclo termodinámico Rankine y sus variantes para impulsar una turbina de vapor. El más reciente es la turba: tiene un porcentaje alto de humedad (hasta 90%), bajo poder calorífico (menos de 2000 kcal/kg) y poco carbono (menos de un 50%). Se debe secar antes de su

uso. Se encuentra en zonas pantanosas. Centrales termoeléctricas que operan con motores de combustión interna usan productos derivados del petróleo. En general, los motores diésel utilizan un destilado ligero del petróleo denominado diésel (Fuel oil No. 2); por otra parte, los modelos más recientes pueden quemar diferentes combustibles como el gas natural, gas asociado a petróleo crudo, combustibles vegetales, emulsiones de residuos pesados y Búnker C (fuel oil No. 6). Otro producto comúnmente utilizado en la producción de energía eléctrica es el gas natural. Al igual que el carbón y el crudo, yacimientos de gas natural son encontrados en grandes cantidades debajo de la corteza terrestre y son el resultado de la descomposición de animales y plantas de hace millones de años atrás, sometidos a altas presiones y temperaturas. Además de su presencia en yacimientos fósiles, el gas natural puede obtenerse a partir de la descomposición de los restos orgánicos. Este proceso es promovido en plantas de tratamiento especializadas que producen el denominado biogás. Centrales que aprovechan este recurso utilizan turbinas de gas con el ciclo termodinámico Brayton. Por último, la biomasa consiste en la combustión de desechos orgánicos tales como cañas de azúcar, madera, bambú, cáscaras de arroz, tusa de mazorca de maíz, algas, aserrín, hojas y ramas de árboles, desechos de animales de granja. En otros casos, se almacenan los desechos para producir biogás, el cual es un gas combustible que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, por las reacciones de biodegradación de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos y otros factores, en ausencia de oxígeno (esto es, en un ambiente anaeróbico).

NUCLEARES

Una central nuclear es una central termoeléctrica en la que actúa como caldera un reactor nuclear. La energía térmica se origina por las reacciones nucleares de fisión en el combustible nuclear formado por un compuesto de uranio (Nuclenor, 2007). La fisión es una reacción nuclear que se lleva a cabo en los núcleos atómicos de los elementos químicos y consiste en la separación de núcleos pesados en unos más pequeños.

Reacciones de este tipo liberan grandes cantidades de energía en forma de calor y radiación, por lo que la materia que se encuentre alrededor del espacio en donde se produce la fisión se calentará.

El combustible nuclear se encuentra en el interior de una vasija herméticamente cerrada, junto con un sistema de control de la reacción nuclear y un fluido refrigerante constituyendo lo que se llama un reactor nuclear. El calor generado en el combustible del reactor y transmitido después a un refrigerante se emplea para producir vapor de agua, que acciona el conjunto turbina-

alternador, generando la energía eléctrica.

La central se ha realizado con un diseño específico que prevé estructuras civiles adecuadas, sistemas duplicados que responden al fallo previsto de uno de ellos y coeficientes de sobredimensionamiento para resistir el sismo máximo esperable, proteger contra las radiaciones ionizantes, prevenir los accidentes posibles y mitigar sus consecuencias. Por este motivo, los edificios de una central nuclear en comparación con una convencional de similar potencia son mucho más robustos y grandes para alojar los sistemas redundantes instalados (Nuclenor, 2007).

Los elementos de una central nuclear son: el circuito primario donde se produce la reacción nuclear, el circuito secundario para la generación de electricidad, el sistema de refrigeración y el sistema de seguridad. El circuito primario contiene el reactor nuclear, el combustible fisible (uranio 235 o el plutonio 239), las barras de control que ayudan a acelerar o frenar las reacciones en cadena de liberación de neutrones; todos estos elementos se albergan dentro de una estructura de contención hecha de hormigón designada para impedir que la radiactividad sea liberada al ambiente.

En un reactor nuclear, cuando un neutrón libre es bombardeado hacia las barras de combustible, el núcleo lo absorbe y se produce una versión inestable del átomo; posteriormente se lleva a cabo la separación de núcleo en varios fragmentos, que a su vez chocan con átomos vecinos y producen una reacción en cadena.

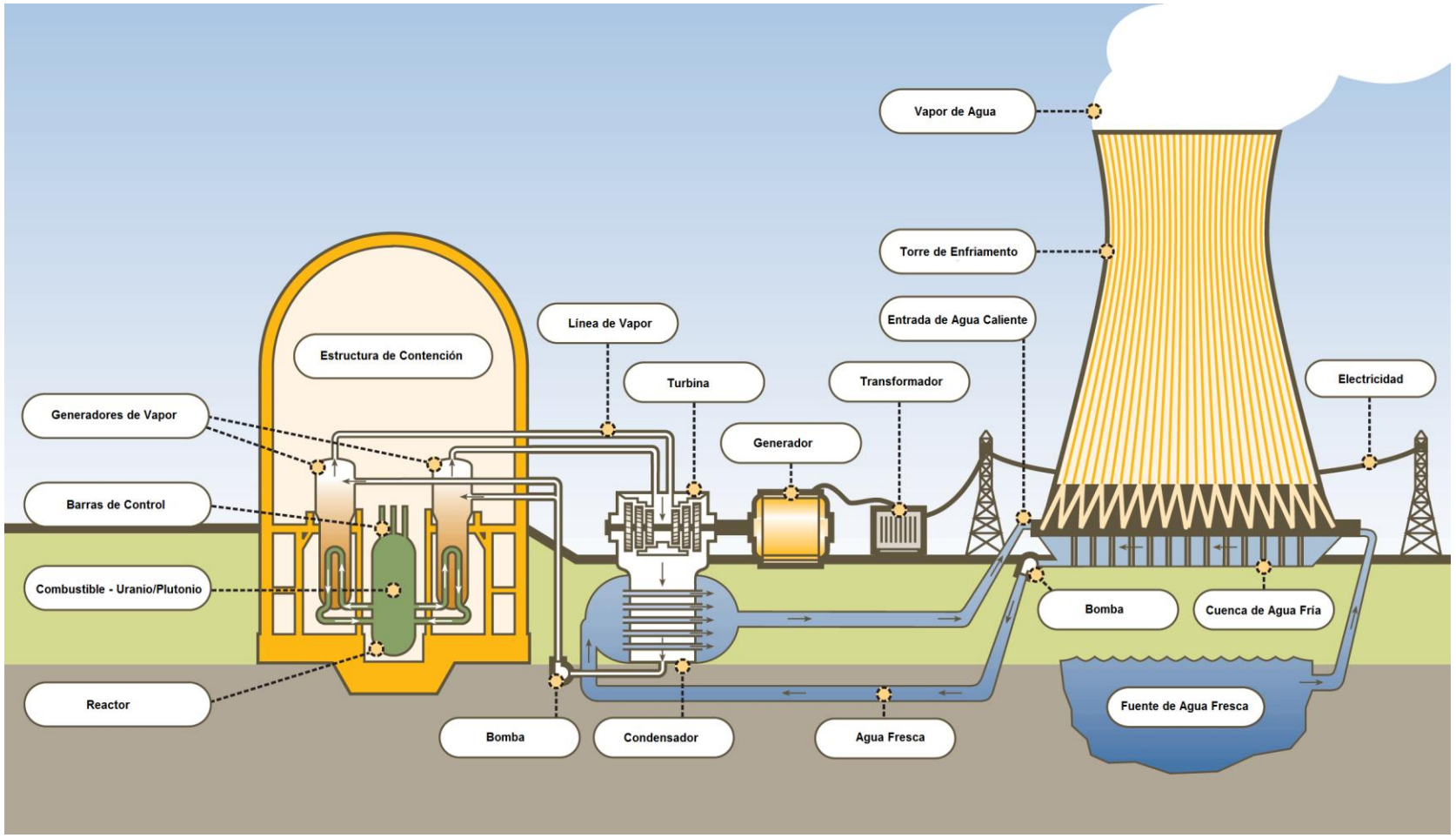
La energía liberada en forma de calor gracias a este proceso es utilizada para la producción de vapor, y dicho vapor es usado de igual manera que en un ciclo termodinámico de centrales termoeléctricas.

Existen distintas configuraciones de reactores: de agua presurizada, de agua hirviendo, de agua pesada y grafito-gas. Estos diseños utilizan agua (ya sea de río o de mar) como medio de enfriamiento; sin embargo, el aprovechamiento de la propiedad intensiva del agua varía a cada caso. Reactor de agua presurizada (PWR): El combustible se encuentra dentro de un recipiente con agua, y las altas presiones dentro del reactor impiden que el agua se convierta en vapor pero que sí aumente su temperatura. La energía contenida en el agua a altas temperaturas es transferida en forma de calor al circuito de agua, el cual cambia de fase de líquido a vapor y es usado para impulsar las turbinas. Reactor de agua hirviendo (AWR): El arreglo es similar al del reactor de agua presurizada, excepto que la presión del reactor es menor; por consiguiente, se le permite al agua cambiar de fase líquida a vapor, el cual es utilizada directamente para impulsar las turbinas. Reactor de agua pesada (HWR): este tipo de arreglo permite utilizar como combustible el uranio natural sin necesidad de enriquecimiento, ofreciendo así un grado de dependencia energética. Aunque requiere la necesidad de instalaciones de producción de agua pesada (D_2O).

Reactor de Grafito-Gas: este tipo de reactores usan grafito como moderador

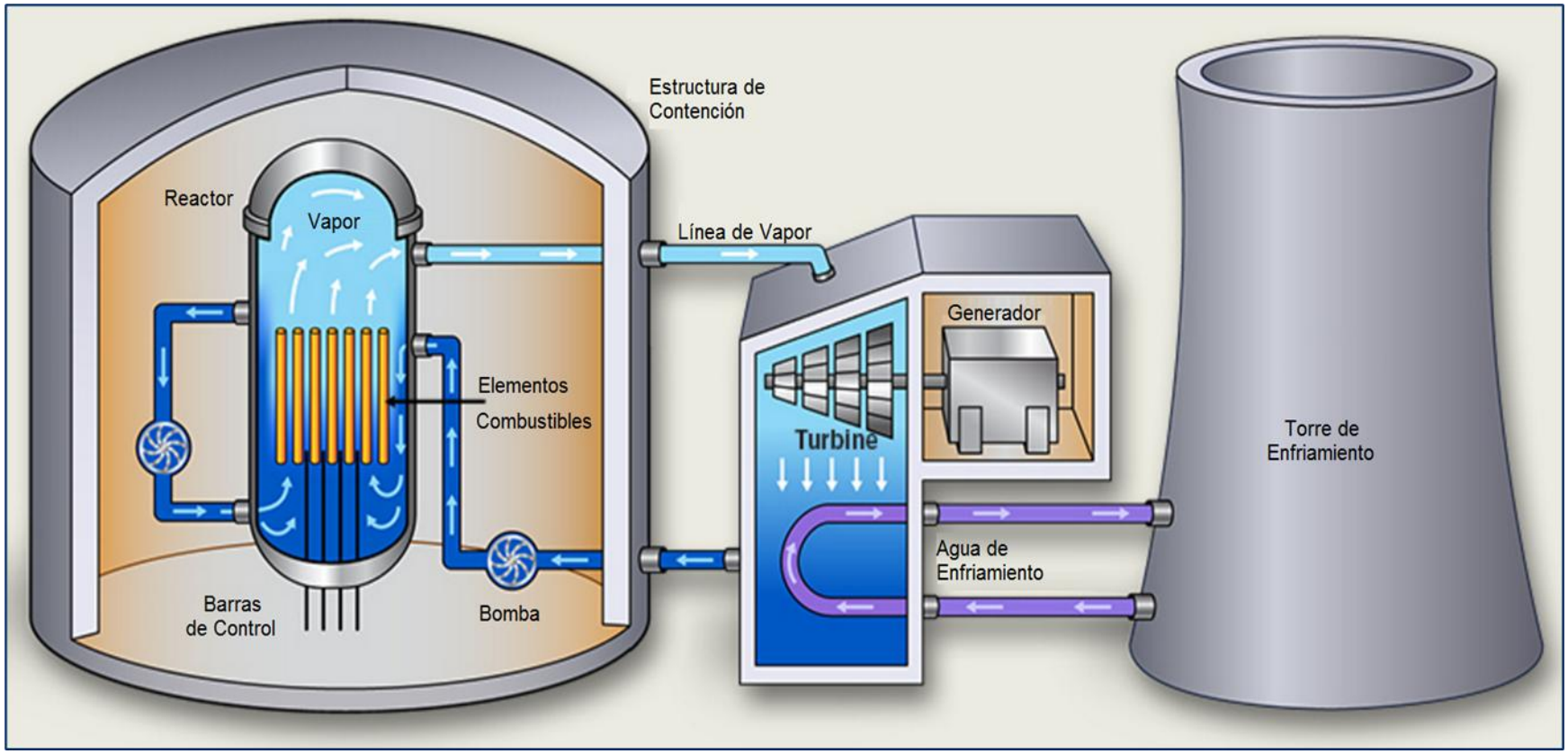
y CO_2 como refrigerante. Mientras que los primeros reactores de este tipo emplearon uranio natural en forma metálica, los actuales denominados avanzados de gas (AGR) utilizan óxido de uranio enriquecido. La gran ventaja de las centrales nucleares es que debido a la gran cantidad de energía que producen, éstas son utilizadas como centrales base para suplir la demanda del sistema; además, no producen emisiones de gases de efecto invernadero al ambiente ya que el combustible utilizado no es de origen fósil. A pesar de ello, tiene la gran desventaja de producir grandes cantidades de residuos radiactivos nocivos para la salud y, por consiguiente, su manejo y descarte es muy delicado. Otra gran preocupación que surge con la dependencia de centrales nucleares es la posible pérdida del refrigerante, el cual conllevaría a que el reactor se funda y la radiación contenida en él se libere hacia el ambiente. En la Figura 6, Figura 7 y la Figura 8 muestran los ciclos de operación de centrales nucleares.

Figura 6: Central nuclear con reactor de agua presurizada



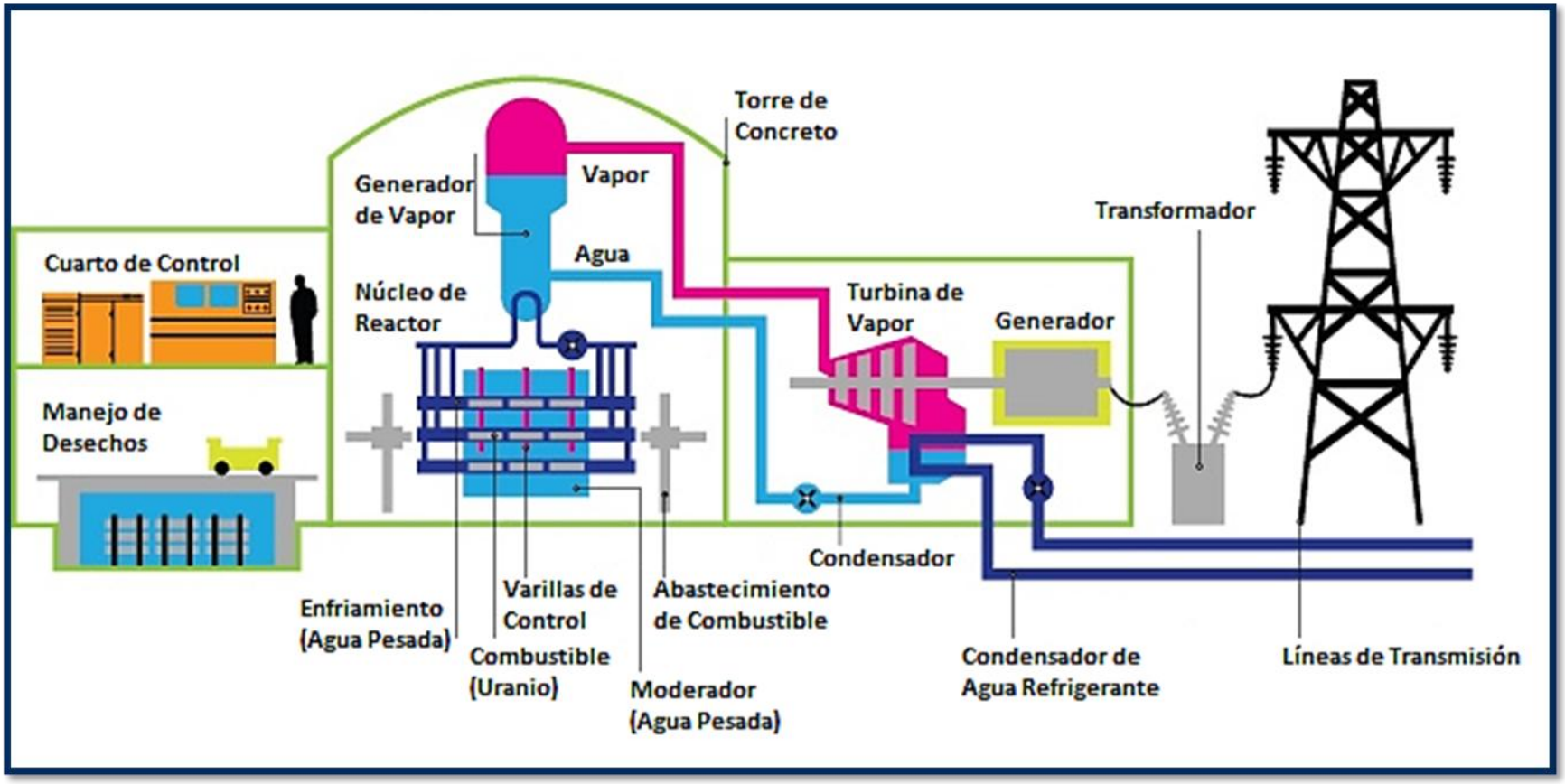
Referencia: (Nuclear Power, 2014).

Figura 7: Central nuclear con reactor de agua hirviendo



Referencia: (Nuclear Power, 2014).

Figura 8: Central nuclear con reactor de agua pesada



Referencia: (Reactor Heavy Water, 2016).

El término energía solar se refiere al aprovechamiento de la energía que proviene del Sol. Se trata de un tipo de energía renovable. La energía contenida en el Sol es tan abundante que se considera inagotable. El Sol lleva 5 mil millones de años emitiendo radiación solar y se calcula que todavía no ha llegado al 50% de su existencia.

La energía solar, además de ser inagotable es abundante: la cantidad de energía que el Sol vierte diariamente sobre la Tierra es diez mil veces mayor que la que se consume al día en todo el planeta. La radiación recibida se distribuye de una forma más o menos uniforme sobre toda la superficie terrestre, lo que dificulta su aprovechamiento.

La energía solar es la energía contenida en la radiación solar que es transformada mediante los correspondientes dispositivos, en forma de energía térmica o energía eléctrica, para su consumo posterior allá donde se necesite (Formosa, 2018).

El elemento encargado de captar la radiación solar y transformarla en energía útil es el panel solar. Los paneles solares pueden ser de distintos tipos dependiendo del mecanismo escogido para el aprovechamiento de la energía solar:

- Mediante módulos fotovoltaicos (energía solar fotovoltaica)
- Mediante captadores solares térmicos (energía solar térmica)
- Sin ningún elemento externo (energía solar pasiva)

Energía Solar Fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica consiste en la transformación directa de la radiación solar en energía eléctrica. Este tipo de energía, a menudo se la denomina directamente energía fotovoltaica. Esta transformación en energía eléctrica se consigue aprovechando las propiedades de los materiales semiconductores mediante las celdas fotovoltaicas. El material base para la fabricación de paneles fotovoltaicos suele ser el silicio. Cuando la luz del Sol (fotones) incide en una de las caras de la célula solar genera una corriente eléctrica (ML-Ingesol, 2023).

Las celdas fotovoltaicas pueden configurarse para crear módulos que a su vez pueden conectarse en serie y/o paralelo para incrementar el voltaje y/o corriente y conectarse a la red eléctrica, o bien en sitios aislados, por medio de sistemas que incluyen baterías.

A la fecha se pueden definir claramente tres generaciones de desarrollo tecnológico:

1. Placas planas de silicio cristalino.
2. Láminas delgadas hechas con silicio amorfo o materiales sin silicio.

Tecnologías emergentes e innovadoras, tales como la concentración fotovoltaica (espejos o lentes plásticos dirigen rayos solares a celdas fotovoltaicas), celdas fotovoltaicas orgánicas, láminas delgadas diseñadas con impresoras de tinta y plásticos conductivos, etc.

Dependiendo de la construcción, los módulos fotovoltaicos pueden producir electricidad a partir de una gama concreta de frecuencias de la luz, pero en general no puede cubrir toda la gama solar (en concreto, la luz ultravioleta, infrarroja y baja o difusa).

Por tanto, otro concepto de diseño es la de dividir la luz en diferentes longitudes de onda y dirigir los haces en diferentes células sintonizadas en estos rangos. Esto ha sido proyectado para ser capaz de elevar la eficiencia en un 50%. Científicos de Spectrolab, una filial de Boeing, informaron del desarrollo de células solares multi-unión con una eficiencia de más del 40%, un nuevo récord mundial de células solares fotovoltaicas. Los científicos de Spectrolab también predicen que las células solares de concentración podrían llegar eficiencias de más de 45% o incluso 50% en el futuro, con eficiencias teóricas de alrededor del 58% en las células con más de tres uniones (Memarsa, 2023).

En base a lo observado con el transcurso de los años se espera que se siga invirtiendo aún más en investigación y mejoramiento de esta. La producción de energía eléctrica mediante fuentes solares fotovoltaicas será más competitiva en comparación con fuentes de energía convencionales en términos de precio, vida útil y eficiencia. Un ejemplo de estos paneles se muestra en la Figura 9.

Figura 9: Paneles Fotovoltaicos.



Referencia: (Laboratory National Renewable Energy, 2019).

Los módulos fotovoltaicos tradicionales están formados por un grupo de celdas de silicio conectadas entre sí en serie, por lo tanto, la pérdida causada por cualquier daño, incluso microgrietas, en cada celda individual se multiplica a través del sistema. De manera similar, al amanecer y al anochecer, algunas celdas que se encuentran en la sombra (luz difusa) provocan pérdidas que la tecnología tradicional no puede soportar (Energy Review, 2020). Eso ni siquiera tiene en cuenta la pérdida estándar del 3-5% en la conversión de energía. Para resolver esto se idea una arquitectura modificada de grafeno, la cual responde significativamente mejor tanto a la luz dispersa como a la baja, e

incluso cuando algunas celdas están en la sombra profunda, no afecta la sensibilidad del resto del módulo activo, como lo hace en la tecnología tradicional. Además, su proceso de fabricación a baja temperatura significa que hay menos daño inadvertido en las etapas de producción e instalación: no más soldadura por calor significa menos estrés térmico y menos casos de grietas en las células de silicio. Eso significa una vida más larga para los módulos, nuevamente, ahorrando significativamente en costos de producción en curso (Energy Review, 2020).

El área efectiva que ocupa un panel convencional implica un papel fundamental a la hora de evaluar la generación por área ocupada unitaria por panel, esto ha hecho que se evalúen distintas maneras a la hora de diseñar los módulos fotovoltaicos, una de las nuevas maneras que se ha desarrollado es la Solar Sunflower, un dispositivo que se abre y se cierra detectando los rayos del sol y rastreando la irradiancia vertical del sol, no solo es una fuente limpia de energía, sino que también produce un 40% más de energía que los paneles solares normales, un ejemplo de esta se muestra en la Figura 10.

Figura 10: Modelo panel Solar Sunflower



Referencia: (Solar Reviews, 2022)

De igual manera se están realizando estudios para saber qué tan viable es la instalación de paneles solares flotantes en cuerpos de agua, específicamente embalses, ya sean de uso humano (agua potable) o de uso propiamente energético, la preocupación principal con este sistema es la creación de patógenos y la lixiviación potencial que estos sistemas tengan sobre dichos cuerpos, esto se está estudiando obteniendo resultados positivos tanto para la fauna habitante del embalse como para el consumo humano después de un proceso de tratamiento de agua en los peores casos simulados.

La autoridad del Canal de Panamá lleva adelante pruebas con este sistema desde el 2016 en un área aproximada de 400 metros cuadrados con 88 paneles de 250 W cada uno, en un pequeño lago en Lake View (contigua al Lago Miraflores), se desarrolla el proyecto con la premisa de que la producción de una planta fotovoltaica flotante debe ser como mínimo igual a la de una planta tradicional sobre tierra, sin embargo, estudios

indican que se puede obtener hasta un 10% de producción adicional por el efecto de refrescamiento del módulo al estar sobre un cuerpo de agua. El tema más importante por cuidar es el crecimiento de la vegetación acuática en los alrededores de la estructura flotante, esta no es muy complicada de remover ya que sus raíces no tienen suelo donde formarse, en cuanto a la fauna no se ven afectaciones por parte de estos a la estructura. Se espera que este proyecto de la ACP sirva de base para que otros proyectos más grandes puedan ser puestos en marcha en el mismo Canal como en el resto del país. Este sistema se puede observar en la Figura 11.

Figura 11: Sistema de paneles fotovoltaicos flotantes



Referencia: (Betsolar, 2023)

Otro de los enfoques que se está desarrollando es el de la inclusión de infraestructura solar sobre las carreteras, desarrollando sistemas de células solares incrustados en una estructura de material compuesto que se puede usar de superficie de una carretera bajo condiciones severas, ya que durante todo el día la infraestructura de transporte recibe energía solar de los rayos del sol, almacenando gran parte de ellos como calor que se disipa en la noche, recolectando energía de una infraestructura ya existente evaluando paneles de estructura rígida y flexibles, esta tecnología se ha venido desarrollando en países como Francia, China, sin tener el despegue esperado, ya que arroja resultados desalentadores por su ineficiencia en producción de energía, específicamente en 2016 en Normandía, Francia se inauguró este proyecto de 2.8 km de paneles solares Wattway, dando al primer año la mitad de la producción esperada, y al segundo un cuarto de la producción esperada, y para junio del 2020 una octava parte de la producción esperada como consecuencia del tráfico pesado de la zona, deteriorando y ensuciando de tal forma que salía muy caro su mantenimiento, de igual manera en 2014 en Indiegogo se ideaba para aceras y carriles de bicicletas, pero el proyecto se no despego gracias a numerosas rupturas de los módulos ideados de paneles solares hexagonales y su mal funcionamiento con la lluvia. Por otro lado, en China se levantó una carretera solar para alimentar 800 viviendas, se dieron problemas de vandalismo, con la desaparición de bloques de módulos.

Uno de los proyectos que promete ser bastante seguro es desarrollado en

Holanda instalando 150 metros de carriles para bicicleta fotovoltaicos integrados a bloques de hormigón en el año 2019, de igual manera se sigue buscando mejorar la eficiencia y la rentabilidad de estos proyectos con varios enfoques de este. Un ejemplo de este tipo de tecnología se puede observar en la Figura 12.

Figura 12: Células solar incrustada en carretera

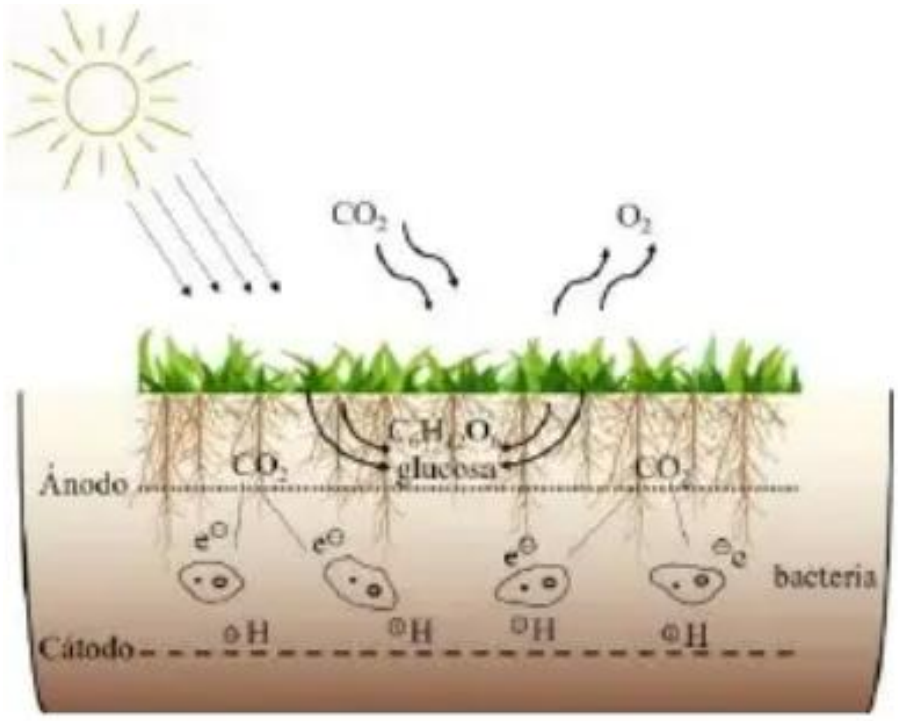


Referencia: (Wind for Future Magazine, 2020)

Celda bio-fotovoltaica

Por otra parte, también se están desarrollando celdas bio-fotovoltaicas, la cual utilizan el proceso natural de la fotosíntesis para generar energía eléctrica. La planta produce materia orgánica a partir de la luz solar y el CO_2 a través de la fotosíntesis. Esta materia orgánica puede ser oxidada por bacterias que viven en y alrededor de las raíces, liberando CO_2, protones y electrones, como se observa en la Figura 13. Los electrones son donados por las bacterias al ánodo y está acoplado a través de una carga externa a un cátodo. Los protones que se liberaron en el lado del ánodo viajan a través de una membrana hacia el cátodo (Salgado, Zepeda, Prado, Villalobos, & Cruz, 2019). Además de que se estudian celdas fotovoltaicas con compuestos bilógicos de membranas tilacoides y bilirrubina oxidasa, carbono poroso hibridado con carburo de tungsteno, derivados de clorofila, todos estos realizando reacciones redox, creando una diferencia de potencial entre sus placas.

Figura 13: Esquema gráfico de una celda fotovoltaica



Referencia: (Salgado, Zepeda, Prado, Villalobos, & Cruz, 2019)

Energía Solar Térmica

La energía solar térmica consiste en el aprovechamiento de la energía procedente del Sol para transferirla a un medio portador de calor, generalmente agua o aire.

Entre las distintas aplicaciones de la energía solar térmica existe la posibilidad de generar energía eléctrica. La tecnología actual permite calentar un fluido con la luz solar para luego producir vapor y posteriormente obtener energía eléctrica (Yuba, 2015).

Panamá actualmente cuenta con 103 proyectos piloto de energía solar térmica con el proyecto Termosolar Panamá, como se observa en la Figura 14, de los cuales 46 se encuentran en el sector hotelero, 23 en el sector gubernamental, 23 en residencial y 11 en agroindustrias (ITSE, 2020).

Figura 14: Proyecto Termosolar



Referencia: (Ministerio de Ambiente, 2022)

Concentración Solar

En este tipo de centrales se aprovecha directamente la energía proveniente del sol. La radiación solar es recolectada a una zona en específico, provocando que un fluido de trabajo se caliente, que a su vez será utilizado para mover una máquina térmica y un generador eléctrico vía ciclo termodinámico convencional con el objetivo de producir energía eléctrica; como beneficio adicional, puede aprovecharse la energía térmica del fluido para usos directos, tales como calefacción, enfriamiento y procesos industriales entre muchos otros. El calentamiento del fluido se hace por lo general por medio de dispositivos ópticos (espejos) que concentran la radiación solar, logrando altas temperaturas.

Las centrales de concentración solar tienen la ventaja adicional de que pueden permitir, mediante inversiones adicionales, almacenar la energía en forma de calor, de manera que es posible generar electricidad aun cuando no hay radiación solar, incluyendo días con alta nubosidad y/o después del ocaso. Cuando se cuenta con un sistema de almacenamiento térmico, permite:

- Evitar fluctuaciones en el suministro.
- Continuar la producción en horas de ausencia de radiación solar, en las que no es posible la generación directa.
- Trasladar los picos de producción de acuerdo con las necesidades de la demanda.

Por ejemplo, si se utiliza un fluido con alta capacidad térmica para almacenar la energía solar durante las horas de mayor incidencia, dicha energía puede aprovecharse en las horas de la noche mediante la producción de electricidad.

Centrales con almacenamiento de energía obtienen mejores factores de planta en comparación con aquellas que no cuentan con dicho almacenamiento.

Hasta la fecha se han diseñado e implementado cuatro configuraciones de concentradores solares, los cuales serán presentados en las siguientes secciones.

Canal Parabólico

Un colector solar cilíndrico parabólico (CCP) está compuesto por un canal cuyo perfil tiene forma de parábola. Esta geometría permite que la radiación solar que incide paralela al eje focal de la parábola se concentre en el foco de la misma (LACYQS, 2015). El sistema cuenta con un sistema de seguimiento solar automático. En el foco de la parábola se extiende como una línea focal a lo largo de todo el canal.

Sobre esta línea se coloca un tubo receptor que contiene un fluido térmico (generalmente aceite) que se calienta cuando el tubo absorbe la radiación solar. Las tuberías están pintadas con un recubrimiento para maximizar la absorción de energía y minimizar la radiación infrarroja. adicionalmente, para reducir las pérdidas de calor por convección hacia el ambiente, las tuberías operan dentro de un tubo de vacío de vidrio.

Estos sistemas suelen trabajar por encima de los 100°C, y pueden acoplarse a un ciclo Rankine de agua vapor para producir electricidad. El sistema en su conjunto tiene 3 componentes: el sistema de concentración, el generador de vapor, y el sistema de potencia.

Por ser la primera configuración desarrollada a nivel mundial, esta representa la tecnología más madura. Se puede observar un ejemplo de esta en la Figura 15.

Figura 15: Sistema de Concentración Solar utilizando espejos



Referencia: (Reve, 2012)

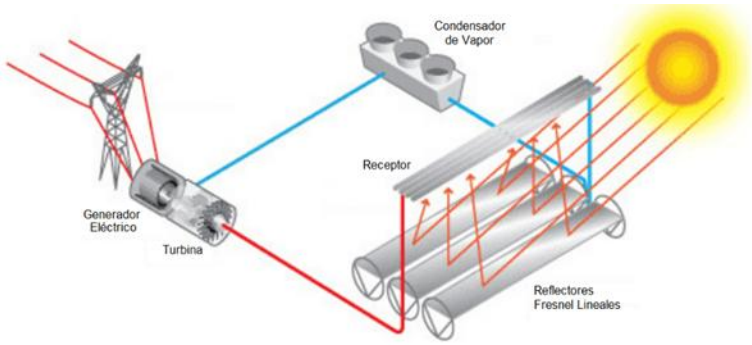
Reflectores Fresnel

Son una nueva tecnología que pretende abrirse camino en competencia directa con los captadores de tipo cilindro-parabólicos. Son sistemas de foco lineal, es decir, concentran la radiación solar a lo largo de una línea, que corresponde a un tubo de absorción por el que circula un fluido térmico (ETSI). Son orientados a diferentes ángulos de inclinación con la finalidad de concentrar la energía solar en un receptor fijo ubicado a varios metros de altura por encima del campo de espejos.

El sistema concentrador está constituido por superficies reflectoras con un elevado radio de curvatura que interceptan, concentran y reflejan la radiación solar dirigiéndola hacia el tubo receptor, situado en un plano diferente al de reflexión. (ETSI)

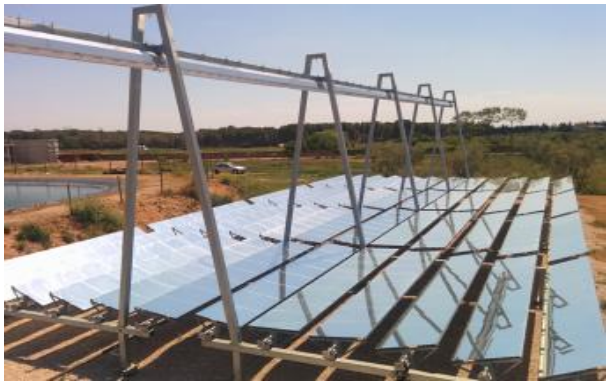
Las eficiencias ópticas obtenidas son menores en comparación con centrales parabólicas; sin embargo, este tipo de centrales son más simples que las primeras, por lo que la hacen económicamente más viable. Esta tecnología la vemos reflejada en la Figura 16 y la Figura 17.

Figura 16 : Central de concentración solar con reflectores Fresnel



Referencia: (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2013).

Figura 17: Ejemplo de reflectores Fresnel



Referencia: (Millennium Energy Systems, 2016)

Torres Solares

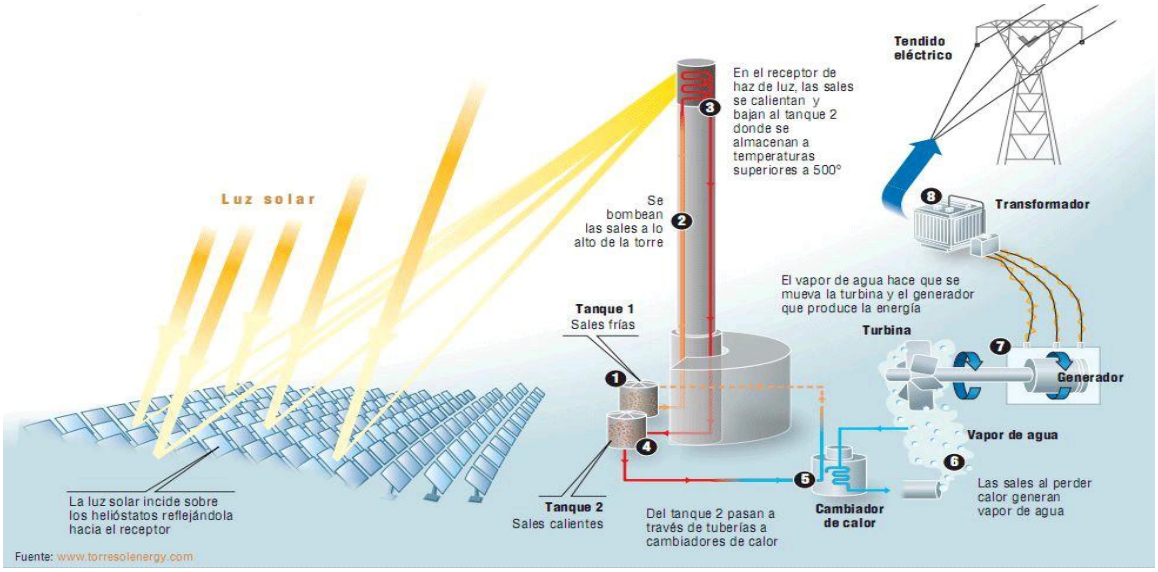
Una central solar de torre central es un tipo de calentador solar que utiliza una torre para captar la luz solar de manera concentrada. Utiliza un conjunto de espejos planos, móviles (llamados heliostatos) para concentrar los rayos del sol sobre una torre colectora.

Los diseños iniciales usaban estos rayos enfocados para calentar agua y utilizan el vapor resultante para impulsar una turbina, con nuevos diseños implementados a lo largos de los años, se ha demostrado que utilizando un fluido diferente (sodio líquido) o fluidos de trabajo de sales fundidas, se obtiene un mejor rendimiento. Implementando sistemas de almacenamiento de energía, con este tipo de tecnología es posible seguir produciendo energía eléctrica en horas de la noche. (Wikipedia, 2023)

Con los helióstatos se pueden conseguir temperaturas de operación mucho más elevadas que con centrales parabólicas y de reflectores Fresnel; por consiguiente, esta alternativa posee la ventaja de altas eficiencias, mejor almacenamiento térmico y altos factores de planta (Figura 18).

Sin embargo, la principal desventaja de centrales con torres solares es el alto costo de inversión y mantenimiento por el uso de los helióstatos.

Figura 18 : Central de concentración solar con torre solar



Referencia: (Ingemecánica)

Discos Solares

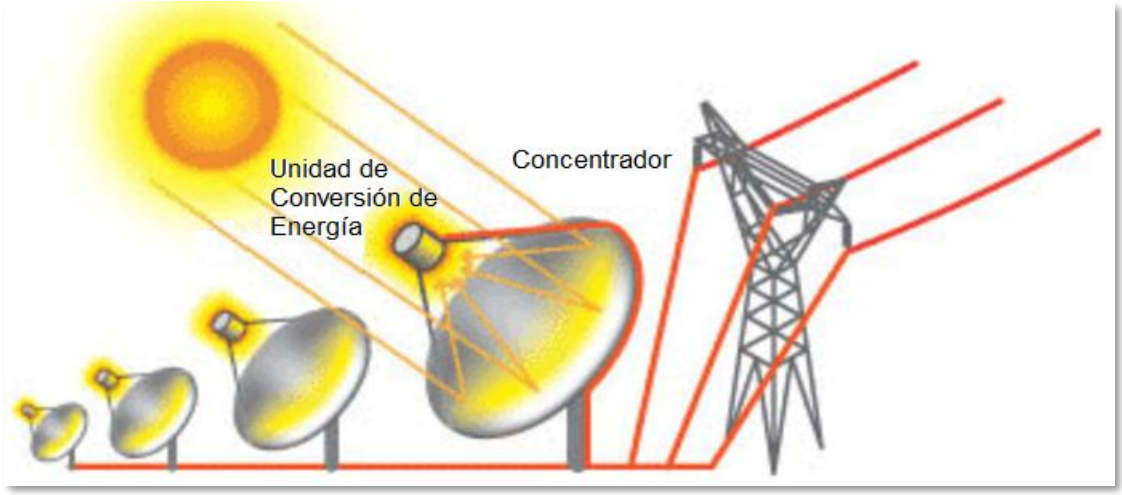
Los sistemas de generación con esta configuración disponen de concentradores con forma parabólica, parecidos a los discos satelitales, con el objetivo de dirigir la radiación solar a un receptor ubicado exactamente en el punto focal del disco.

Como toda tecnología de concentración solar, la reflexión de la componente directa de la radiación solar se consigue a través de una superficie de alta calidad óptica para disminuir posibles errores, el receptor puede ser una máquina Stirling o una microturbina. Dado a la naturaleza de su configuración, esta variante tiene la gran ventaja de modularidad, lo cual es ideal para generación distribuida; sin embargo, sistemas seguidores de rayos solares de dos ejes son requeridos para obtener altos factores de concentración y por consiguiente altas temperaturas de operación. Este elemento es aquel en el que se proyecta el flujo concentrado. Por tanto, se trata de un elemento donde se presentan muy elevadas temperaturas y que hace la función de captar la máxima energía térmica posible incidente para hacerla pasar al motor.

Esta opción ha sido implementada exitosamente y se han reportado altas eficiencias y resulta una alternativa prometedora, el sistema no ha sido implementado a grandes niveles comerciales. En la Figura 19

se muestra un esquema de esta configuración.

Figura 19: Central de concentración solar con discos solares



Referencia: (Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2013).

Espacial

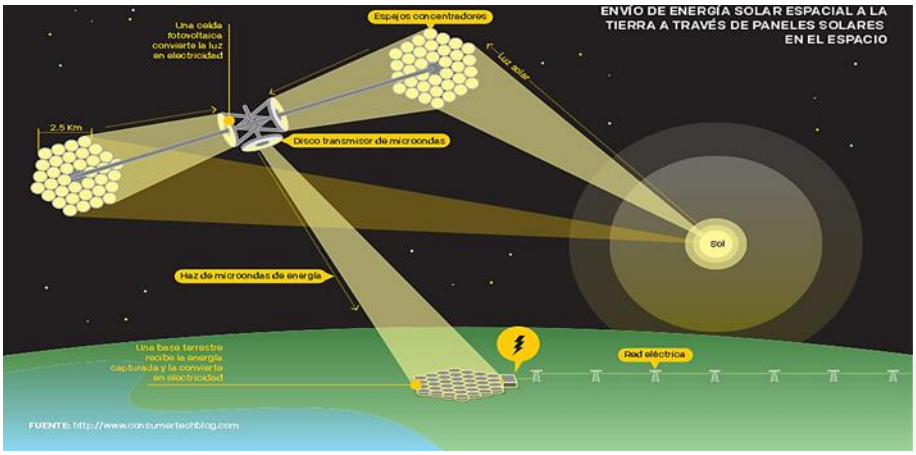
La principal limitación de las centrales fotovoltaicas instaladas en tierra consiste en la cantidad de horas en el día en el que se puede obtener el recurso solar y, si con suerte, el día no se encuentra demasiado nublado para su máximo aprovechamiento.

Por tal motivo se ha considerado la alternativa de obtener continuamente la energía solar mediante la instalación de concentradores de rayos solares en el espacio y enviarlos hacia los módulos fotovoltaicos instalados en los campos solares en la superficie terrestre.

Los satélites enviados al espacio tienen varios reflectores y un transmisor de potencia de microondas o láser. Los reflectores y espejos se encargan de recolectar los rayos solares y son dirigidos hacia el transmisor de potencia para convertir la energía solar en un rayo láser o de microonda. El rayo es orientado ininterrumpidamente hacia centrales receptoras de potencia, donde reciben el rayo y realizan posteriormente la conversión de energía eléctrica.

Como es de esperarse, esta tecnología resulta tener altos costos por los envíos de los satélites al espacio y la construcción de los elementos. A pesar de que se ha probado exitosamente en fase de experimentación la transmisión de 10 kW de potencia en tierra, aún le falta mucha inversión en desarrollo para ser implementada a nivel comercial. En la Figura 20 se muestra el modelo conceptual de esta tecnología.

Figura 20: Ejemplo de Sistema de Generación Solar Espacial.

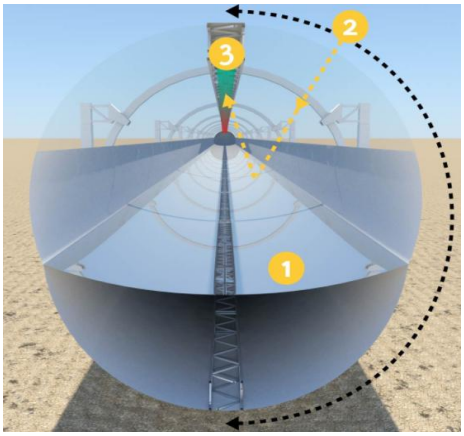


Referencia: (Carrera por Energía Solar Espacial, 2017)

Colector solar inflable

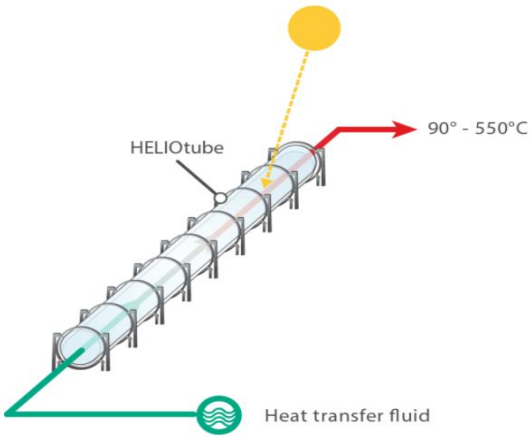
Es un concentrador cilíndrico inflable hecho de tres películas de plástico probadas en la industria, una película base, una película transparente y una película de espejo. La película de espejo divide el concentrador en dos cámaras herméticas que recorren longitudinalmente el tubo. Pequeñas diferencias de presión entre las cámaras superior e inferior arquean la película del espejo hacia abajo. Así, se crea un canal de espejo que concentra los rayos del sol en un receptor térmico en la cámara superior como se muestra en la Figura 21 , este calor se puede aplicar ampliamente para calor solar con fines industriales y electricidad, como por ejemplo generación con almacenamiento térmicos y turbinas de vapor hasta las 24 horas del día. Un diseño de esta tecnología es realizado por la empresa Heliovis como se muestra en la Figura 22.

Figura 21: Funcionamiento de colector solar inflable



Referencia: (Heliovis, 2020)

Figura 22: Diseño HELIOtube de la empresa Heliovis

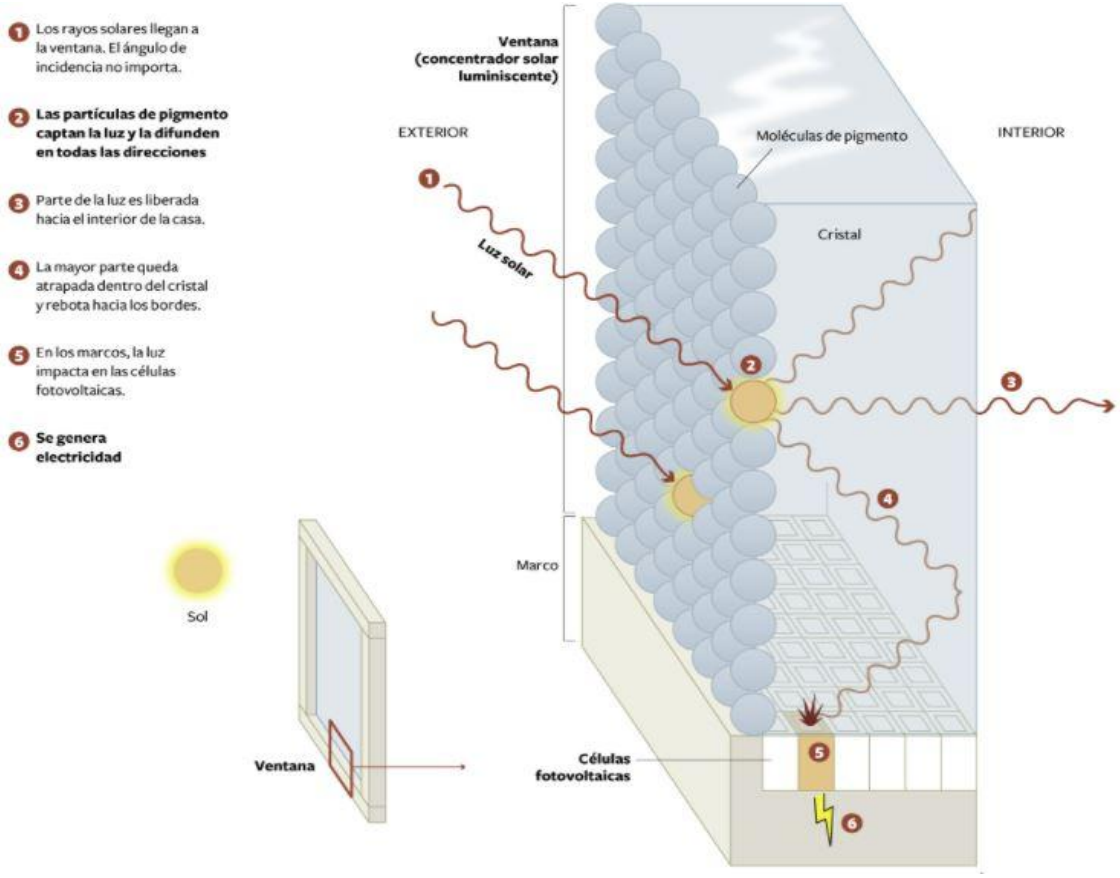


Referencia: (Heliovis, 2020)

Recubrimientos solares para ventanas (Luminiscente)

A diferencia de los sistemas solares fotovoltaicos (PV) convencionales, los revestimientos de las ventanas de energía solar, como en la Figura 23, se pueden aplicar a todos los lados de torres altas o rascacielos, para generar electricidad en condiciones de luz muy diversas. Los recubrimientos han sido diseñados científicamente para funcionar tanto bajo la luz solar natural como con luz artificial. Pero lo realmente especial es que podemos llevar la tecnología al interior y la luz que hay dentro de su oficina se puede utilizar para generar electricidad. La otra característica única de esta tecnología es que la luz no tiene que ser directa, puede ser indirecta, sombreada, difusa o incluso reflejada.

Figura 23: Recubrimientos solares para ventana (luminiscente)



Referencia: (OVACEN, 2022)

EÓLICAS

La energía eólica es una energía renovable que utiliza la fuerza del viento para generar electricidad. El principal medio para obtenerla son los aerogeneradores, correspondientes a "molinos de viento" de tamaño variable que utilizan sistemas de conversión para transformar la energía cinética del viento en energía mecánica de rotación. La energía del viento puede obtenerse instalando los aerogeneradores tanto en suelo firme como en el suelo marino. El potencial eólico se calcula en función de la distribución de la velocidad del viento. Las variables que definen el régimen de vientos en un punto determinado son:

- Situación geográfica
- Características climáticas
- Estructura topográfica
- Irregularidades del terreno
- Altura sobre el nivel del suelo

Para clasificar las centrales eólicas existen tres criterios: orientación de las turbinas (horizontal/ vertical), características de la instalación (en

tierra / mar) y conectividad a la red (conectadas / no conectadas). A continuación, detallaremos la diferencia entre turbinas de eje horizontal y vertical (Generadoras de Chile, 2021).

No obstante, gracias al ingenio y creatividad del ser humano, en los últimos años la tecnología de las turbinas eólicas ha ido evolucionando drásticamente, causando que se desarrollen nuevas configuraciones y que sus costos sean igual de competitivos con las tecnologías convencionales. Las siguientes secciones complementan con más información el avance de las configuraciones mencionadas.

TURBINAS DE EJE HORIZONTAL INSTALADAS EN TIERRA

Las primeras centrales eólicas fueron construidas bajo este principio, por lo que existen comercialmente en todas partes del mundo. El eje es montado de manera paralelo al flujo del viento y del suelo y las aspas están diseñadas de tal forma que se aprovecha al máximo la captura de la energía del viento para convertirla a energía mecánica rotacional, esto se observa en la Figura 24. El movimiento rotacional producido es transmitido y multiplicado mediante un multiplicador de velocidad (caja de cambio) hasta un generador que es el que se encarga de producir la energía eléctrica. Una caja de cambios es una caja con arreglos de engranajes que hace la función de amplificador de velocidad baja a alta para el generador.

El número de aspas también juega un papel muy importante en la eficiencia del generador; tres resulta ser el número adecuado ya que otorgan mejor balance a las fuerzas giroscópicas ejercidas a la turbina.

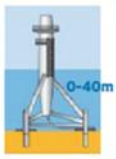
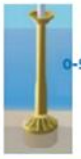
Figura 24: Parque eólico con turbinas de viento de eje horizontal



Referencia: (Energy Sources and Energy Use, 2018)

Esta tecnología surge debido a que en alta mar las velocidades del viento son mucho más estables y mayores que en tierra firme. Otra diferencia significativa es el tipo de fundación diseñada: las de tierra firme son de concreto mientras que las de alta mar pueden estar en el agua (tipo flotante) o fijadas en el suelo marino. La Figura 25 muestra una gama de diseños utilizados en proyectos eólicos junto con sus características, ventajas y desventajas.

Figura 25 : Resumen de diferentes fundaciones fijas disponibles para turbinas de viento en alta mar

	Pilar alto con tapa	Monopilar	Base de gravedad de concreto	Trípode	Tres pilares	Estructura Metálica	Cubeta de succión
Diseño							
Ejemplo	Sakata (JP)	Kamisu (JP)	Choshi (JP)	Longyuan Rudong intertidal (CH)	Bard Off-shore 1 (DE)	Kitakyushu (JP)	Dogger Bank (UK)
Ventajas	• Tapa protege contra colisiones	• Diseño sencillo	• Económicas • No requiere de perforaciones	• Más estable que monopilares	• Pueden ser instaladas con barcazas convencionales de elevación	• Estabilidad • Liviana	• Menos acero • No requiere de perforaciones
Desventajas	• Profundidad de agua limitada • Fabricación compleja	• Diámetro aumenta significativa mente con la profundidad • Perforaciones	• Preparación del fondo del mar es requerida	• Instalación más compleja	• Costos	• Costos	• No es aplicable en fondos de mar sólidos
Comentarios	• Muy común en industrias de tierra firme	• Tipo de fundación más común • Limitaciones en la profundidad del agua	• Instaladas actualmente en aguas poco profundas	• Altos costos de producción debido a la complejidad de la estructura y peso	• Altos costos de producción debido a la complejidad de la estructura y peso	• Comercialmente atractivo > 35m por su flexibilidad y bajo peso (40-50% menos acero que monopilares)	• Aún a desplegarse a escala

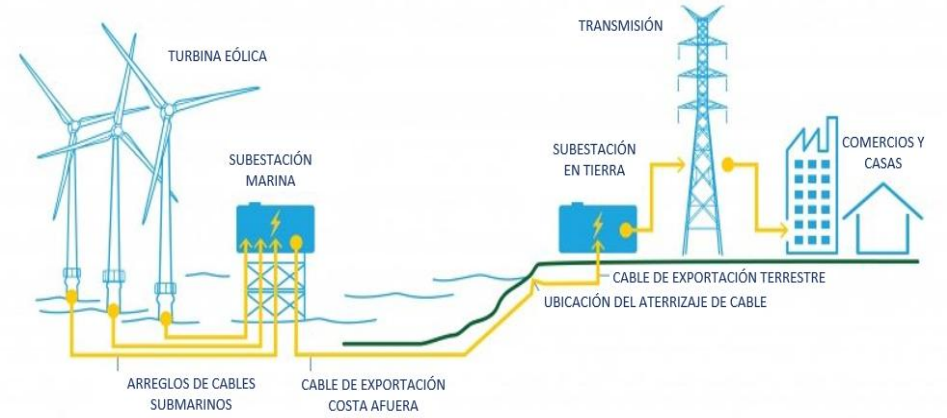
Referencia: (Energy Techonology Systems Analysis Programme & International Renewable Energy Agency, 2016).

Según lo recopilado mediante investigación, la configuración más sencilla y comúnmente usada es la monopilar; sin embargo, dicha configuración solamente puede ser instalada en aguas de hasta 30 metros de profundidad. Las fundaciones flotantes han sido instaladas usualmente en aguas con profundidades mayores a los 50 metros debido a que los costos requeridos para una fundación en el suelo marino son extremadamente altos; no obstante, tales estructuras se encuentran en fase de demostración.

De acuerdo con el estudio presentado por la Organización de Nuevas Energías y Desarrollo Tecnológico Industrial NEDO en 2013, las pérdidas energéticas en el proceso de conversión son las siguientes: entre un 50% a 60% de la energía aerodinámica en las aspas y rotor de la turbina, 4% de

la energía mecánica en la caja de cambios y un 6% de la energía en el generador. En la Figura 26 podemos observar este tipo de tecnologías y como la energía eléctrica es transportada hasta tierra.

Figura 26: Componentes de transmisión de eólica marina

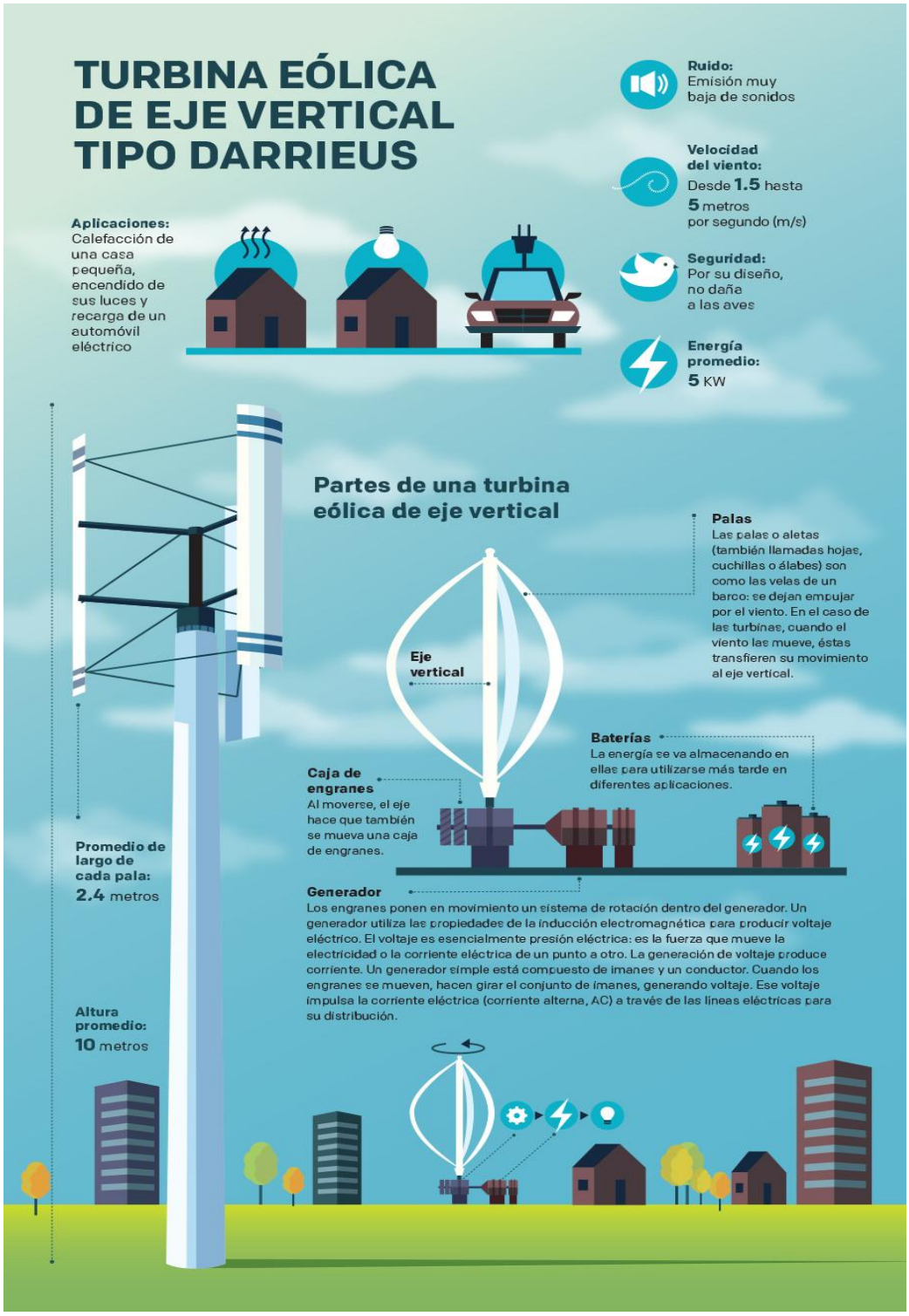


Referencia: (Department of Energy U.S., s.f.)

Turbinas de Ejes Verticales

Esta configuración corresponde a una de las modalidades más modernas en la actualidad y, por sus resultados obtenidos a la fecha, tiene un potencial muy prometedor para competir con fuentes de producción convencionales. En comparación con las turbinas de generación de eje horizontal, estas requieren menos espacio por lo que permiten la instalación de más generadores, además de ser más fácil la fabricación y transporte de los elementos. Otros beneficios de esta configuración son: la reducción considerable de ruido, un mantenimiento más sencillo del generador debido a que éste se encuentra en el suelo, y el efecto sombra o de atenuación de la fuerza del viento es beneficioso. Finalmente, estas pueden instalarse tanto en tierra firme como en alta mar; sin embargo, por ser una tecnología relativamente nueva, sus costos de inversión son muy elevados y varios proyectos de este tipo se encuentran en fase experimental. Puede notarse en la Figura 27 el espacio reducido requerido para la instalación de un parque eólico con esta tecnología. De forma general podemos decir que el rendimiento de los aerogeneradores de eje vertical se encuentra por debajo de la mitad que el correspondiente a aerogeneradores de eje horizontal, hecho que ha dirigido la industria al desarrollo de esto últimos frente al primero.

Figura 27: Modelos de turbinas de viento de eje vertical



Referencia: (ProyectoFSE, 2018)

Turbinas de Viento Flotantes

Un aerogenerador flotante es un concepto de diseño para un aerogenerador con un rotor soportado en el aire sin una torre, que se beneficia de opciones más mecánicas y aerodinámicas, la mayor velocidad y la persistencia del viento en grandes altitudes, al tiempo que evita el gasto de la construcción de la torre.

Esta tecnología surge por el hecho de que a mayor altura la instalación de la turbina de viento, mayor será la velocidad de los vientos y por consiguiente una mayor potencia podrá ser extraída del mismo. Combina las propiedades de una turbina de viento de eje horizontal y las de un dirigible. El dirigible se infla con helio y es mantenido en su posición con cuerdas y estructuras fijadas en el suelo para soportar las fuerzas del viento a elevadas alturas. Ya que estos dispositivos se encuentran a gran altitud, el ruido producido por las aspas es despreciable y requiere de poco mantenimiento. Un prototipo de esta tecnología es mostrado en la Figura 28.

Figura 28 : Prototipo de una turbina de viento flotante



Referencia: (geologiaymedioambiente, 2015)

Turbinas sin aspas

Una de las tecnologías eólicas que se está desarrollando hoy en día son los aerogeneradores basados en la resonancia aero-elástica, básicamente, una turbina eólica sin palas, esta consiste en un cilindro fijo vertical sobre una varilla elástica que se empotra en el suelo. El cilindro oscila en un rango de velocidad de viento, que posteriormente transforma la energía mecánica en electricidad mediante un Figura 29. La estructura está construida con resina reforzada con fibra de carbono y/o fibra de vidrio, materiales ampliamente utilizados en la construcción de palas de los aerogeneradores convencionales. La parte superior del núcleo sostiene el mástil y su parte inferior está firmemente anclada al suelo. Está construido de polímero reforzado con fibra de carbono, que proporciona una alternador. En otras palabras, es una turbina eólica que no es una turbina en realidad. El cilindro exterior es rígido y está diseñado para oscilar, permaneciendo anclado a la varilla o núcleo. El movimiento de la parte superior del cilindro no está restringido, encontrándose aquí la máxima amplitud de oscilación como se muestra en la

gran resistencia a la fatiga y tiene una pérdida de energía mínima cuando oscila. El aerogenerador sin palas captura la energía del viento cuando entra en resonancia debido a un efecto aerodinámico denominado desprendimiento de vórtices. Esta tecnología fue incluida por la Comisión Europea dentro del programa Horizonte 2020 para su desarrollo e innovación.

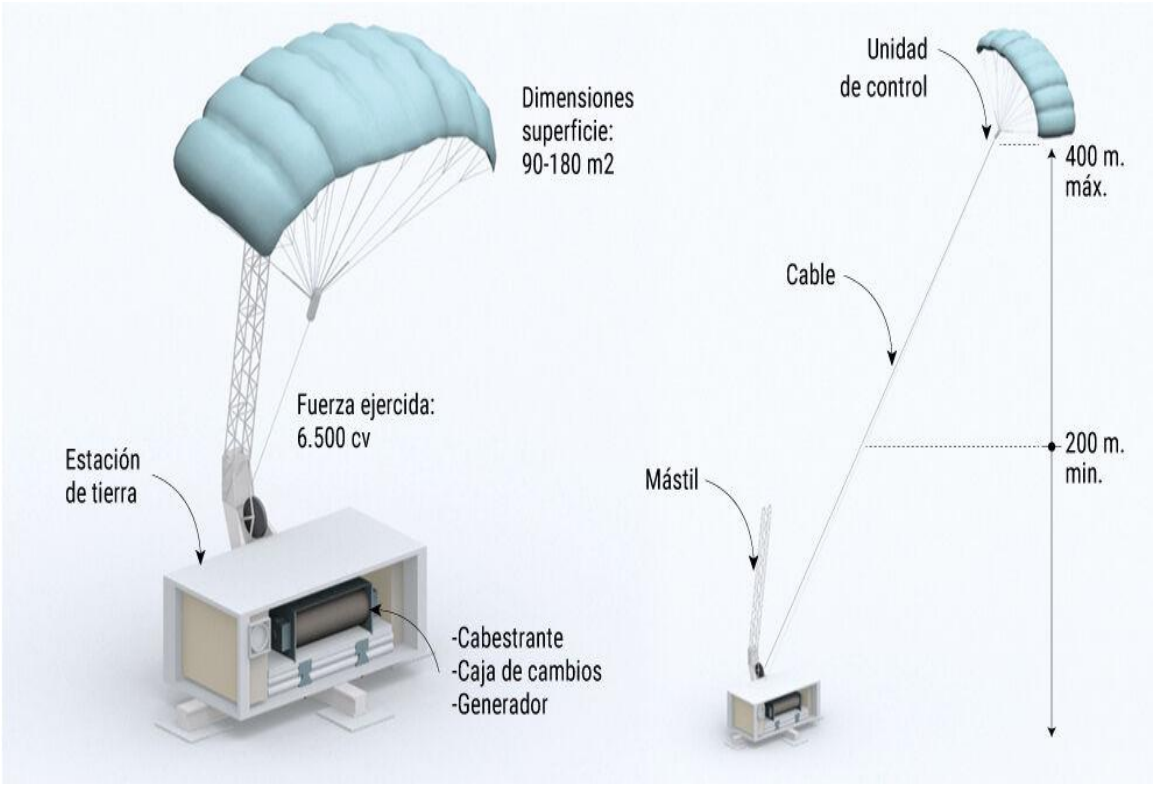
Figura 29: Representación de modelo de turbina de viento sin aspas



Referencia: (Vortex Bladeless, s.f.)

Esta tecnología incluye un hardware aerotransportado incluye una Unidad de Control de Cometas (KCU), el "cerebro volador" del sistema que consiste esencialmente en un manipulador de cable controlado a distancia y la cometa inflable (ala blanda) con su sistema de brida. La KCU está equipada con motores de alta precisión que tiran de las bridas, por lo que controlan el comportamiento de la cometa durante el vuelo y hace uso de una turbina eólica incorporada capaz de alimentar su electrónica de a bordo. El tipo de ala utilizada por el sistema es una cometa inflable de borde de ataque (LEI). Este tipo de cometa es asequible, fácil de transportar, mantener y actualizar. En el suelo, El módulo de tambor/ generador es responsable de la conversión de la potencia de tracción mientras monitorea y adapta constantemente la fuerza en la correa. Este sistema se puede observar en la Figura 30.

Figura 30: Sistema de turbina aerotransportada

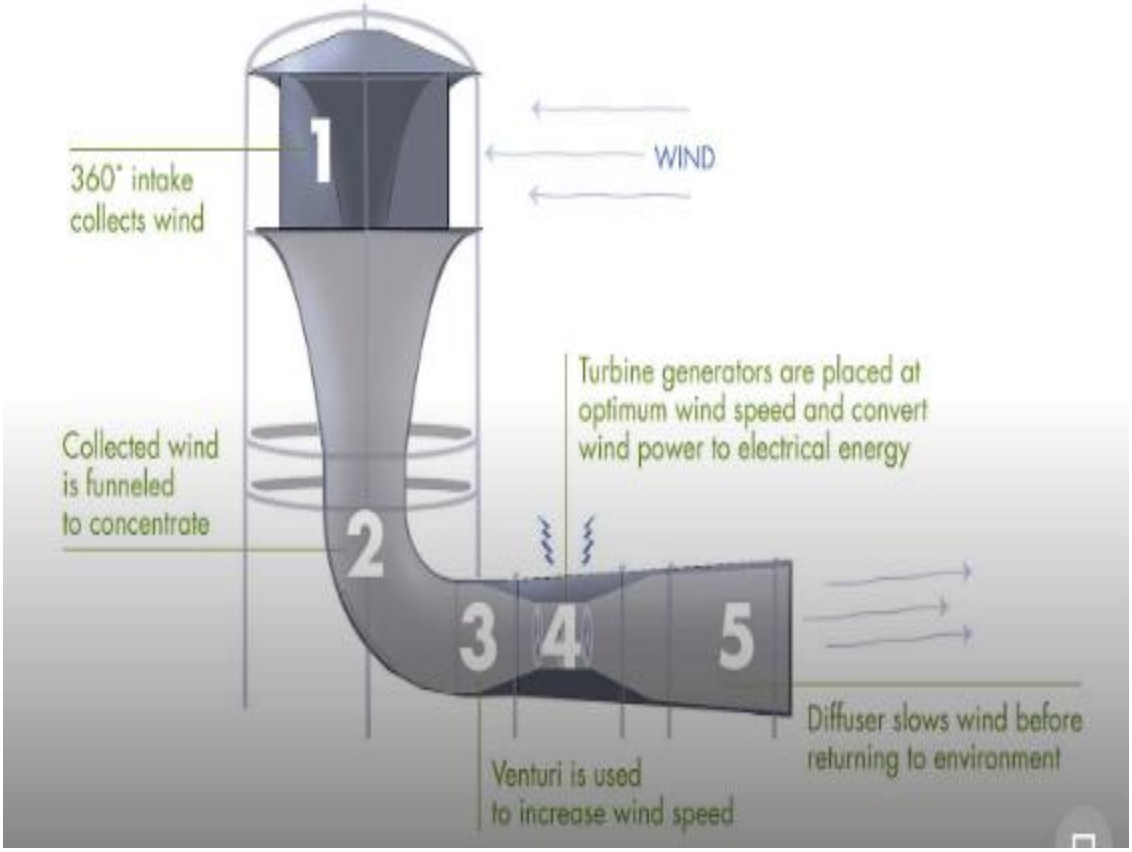


Referencia: (El Mundo, 2022)

Turbinas Canalizadas

Esta es una tecnología centrada en capturar el aire a través de una entrada omnidireccional para permitir la recolección de viento desde cualquier dirección, por lo tanto, el viento se canaliza a través del sistema concentrándose y acelerando en la sección del efecto Venturi, pasando por las turbinas generadoras y devolviendo el viento a la naturaleza por medio del difusor, se muestra esta tecnología en la Figura 31.

Figura 31: Turbina Canalizada SHEERWIND INVELOX



Referencia: (Windpower - Engineering&Development, 2018)

La energía marina es un conjunto de tecnologías para el aprovechamiento de la energía de los océanos. El mar tiene un gran potencial energético, que se manifiesta principalmente en las olas, las mareas, las corrientes y en la diferencia de temperatura entre la superficie y el fondo marino.

El uso de la energía marina no genera impactos ambientales ni visuales considerables y constituye un recurso energético con gran capacidad de predicción. Sin embargo, las condiciones hostiles del mar, la fuerza del oleaje y de la corrosión marina, así como la necesidad de contar con mecanismos para trasladar la energía a tierra, hacen que esta tecnología requiera de grandes inversiones y que aún esté, salvo alguna excepción, en fase pre comercial (Appa renovables, 2022). Debido a que la variabilidad de las mareas y de las olas es menor en comparación con la de los vientos, es más fácil predecir y estimar la generación. A continuación, se describen cada una de las alternativas de generación eléctrica con este recurso renovable.

Undimotriz

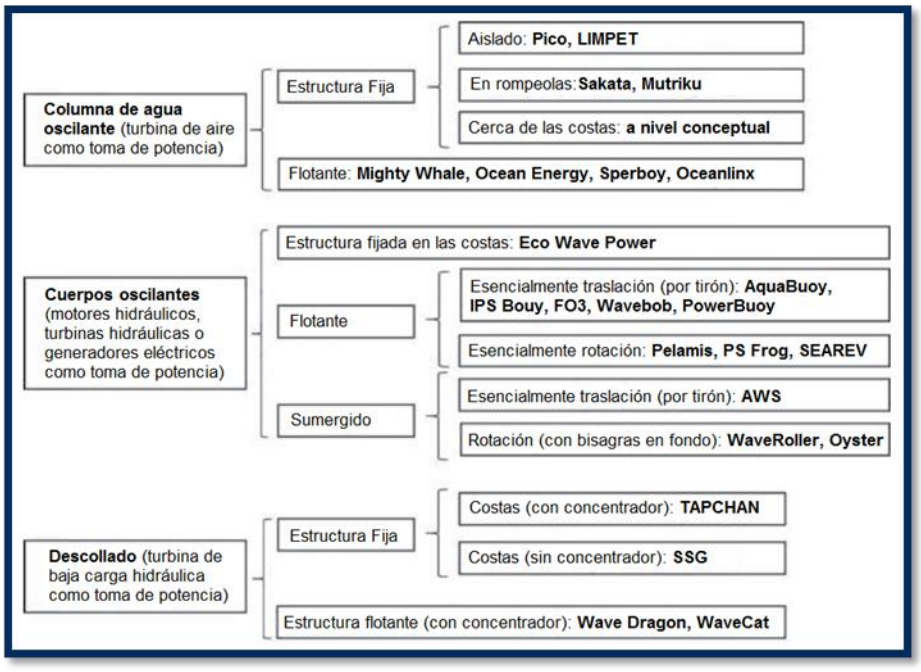
Consiste en el proceso de conversión de energía mecánica proveniente de las olas superficiales en los océanos a eléctrica. Toda central de producción de energía de esta categoría cuenta con cuatro componentes principales:

1. La estructura y el motor principal encargado de capturar la energía de la ola y convertirla a energía mecánica.
2. La fundación o anclaje que mantendrá en su lugar la estructura y el motor principal.
3. El sistema de toma de potencia, el cual convierte la energía mecánica en eléctrica.
4. Los sistemas de control que salvaguardan y optimizan el rendimiento durante las condiciones de operación.

De acuerdo con la información presentada en el informe de la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA por sus siglas en inglés) en su documento "Energía de Olas: Resumen Tecnológico" del año 2014, los dispositivos utilizados para capturar la energía de las olas se clasifican en tres tipos: columna de agua oscilante, cuerpos oscilantes y de desbordamiento.

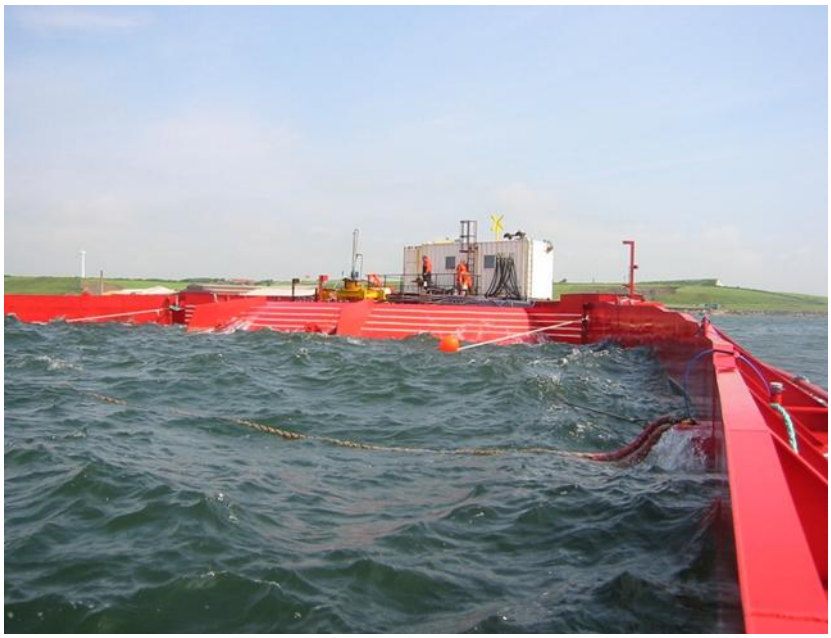
La Figura 32 muestra a mayor detalle las diferentes opciones que hay actualmente desarrolladas. Complementariamente, en la Figura 33, Figura 34, Figura 35 se puede observar diseños de dispositivos que han sido implementados exitosamente.

Figura 32: Clasificación de técnicas de generación de energía Undimotriz



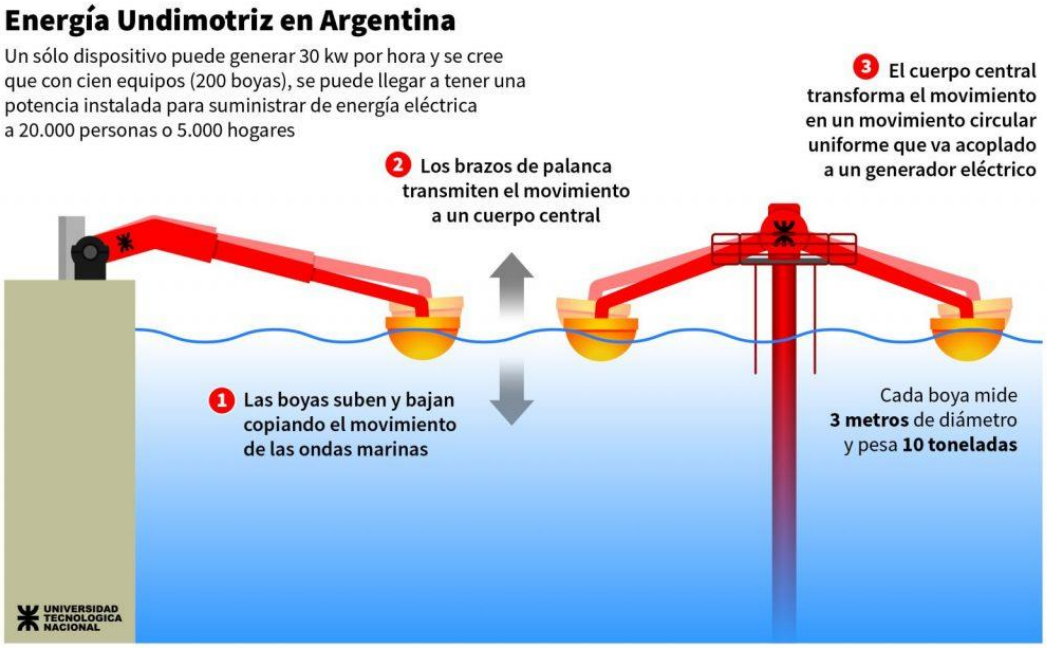
Referencia: (International Renewable Energy Agency, 2014)

Figura 33 : Convertidores de energía Undimotriz por desbordamiento



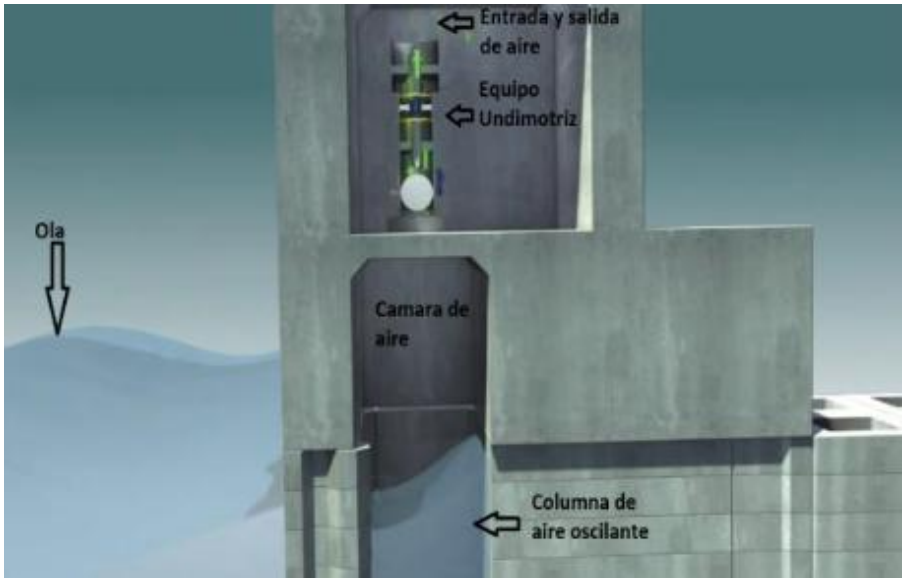
Referencia: (International Renewable Energy Agency, 2014)

Figura 34: Convertidores de energía undimotriz con cuerpos oscilantes



Referencia: (Universidad Tecnológica Nacional - Buenos Aires, 2022)

Figura 35: Convertidores de energía Undimotriz con columnas de agua oscilantes



Referencia: (Universidad Tecnolófica Nacional - Buenos Aires, 2016)

Mareomotriz

Las mareas son producto de las interacciones gravitacionales del sol y la luna con la Tierra; las centrales aprovechan la energía cinética (corrientes de la pleamar y bajamar) y potencial (diferencia de altura entre la pleamar y bajamar) de las masas de agua al implementar turbinas de bulbo similares a las utilizadas en centrales hidroeléctricas instaladas en presas.

La generación de energía con este recurso es posible con las siguientes alternativas:

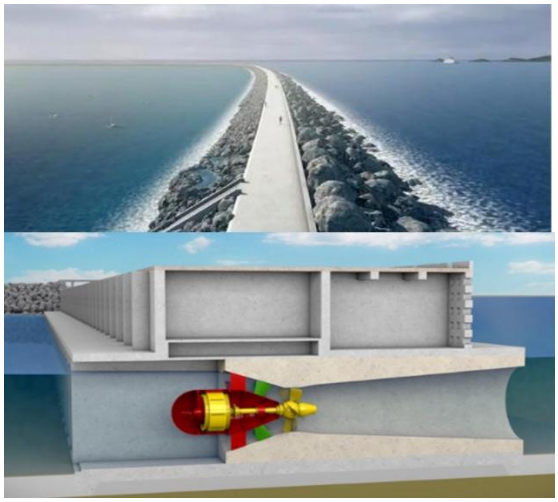
1. Generación unidireccional en la bajamar: Durante la pleamar, las compuertas permanecen abiertas para llenar el reservorio y mantenerlo en su nivel más alto. Cuando inicia la bajamar, el agua del mar desciende del reservorio y pasa por las turbinas. Este ciclo permite generar electricidad por cuatro horas una sola vez al día.

2. Generación unidireccional en la pleamar: Durante la pleamar, las compuertas permanecen cerradas para aislar el reservorio y mantenerlo en su nivel más bajo. Cuando inicia la pleamar, el agua del mar asciende al reservorio y pasa por las turbinas. Este ciclo permite generar electricidad por cuatro horas una sola vez al día.

3. Generación bidireccional: combina los ciclos operativos de los dos primeros escenarios. El ciclo permite generar electricidad por cuatro horas dos veces al día; sin embargo, el sistema requiere de turbinas reversibles, lo cual hace los costos de inversión más elevados en comparación con las dos primeras alternativas.

Un ejemplo de la generación mareomotriz por medio de una turbina unidireccional se muestra en Figura 36.

Figura 36 : Esquema de una central mareomotriz con generación unidireccional



Referencia: (University of Bristol, s.f.)

Además de las alternativas ya mencionadas, las alternativas *off shore* se desarrollan de igual manera, donde se realiza la instalación de turbinas en el lecho marino como en la Figura 37, aprovechando las corrientes marinas más rápidas que fluyen en el lecho marino.

Figura 37: Turbinas de instalación subterránea

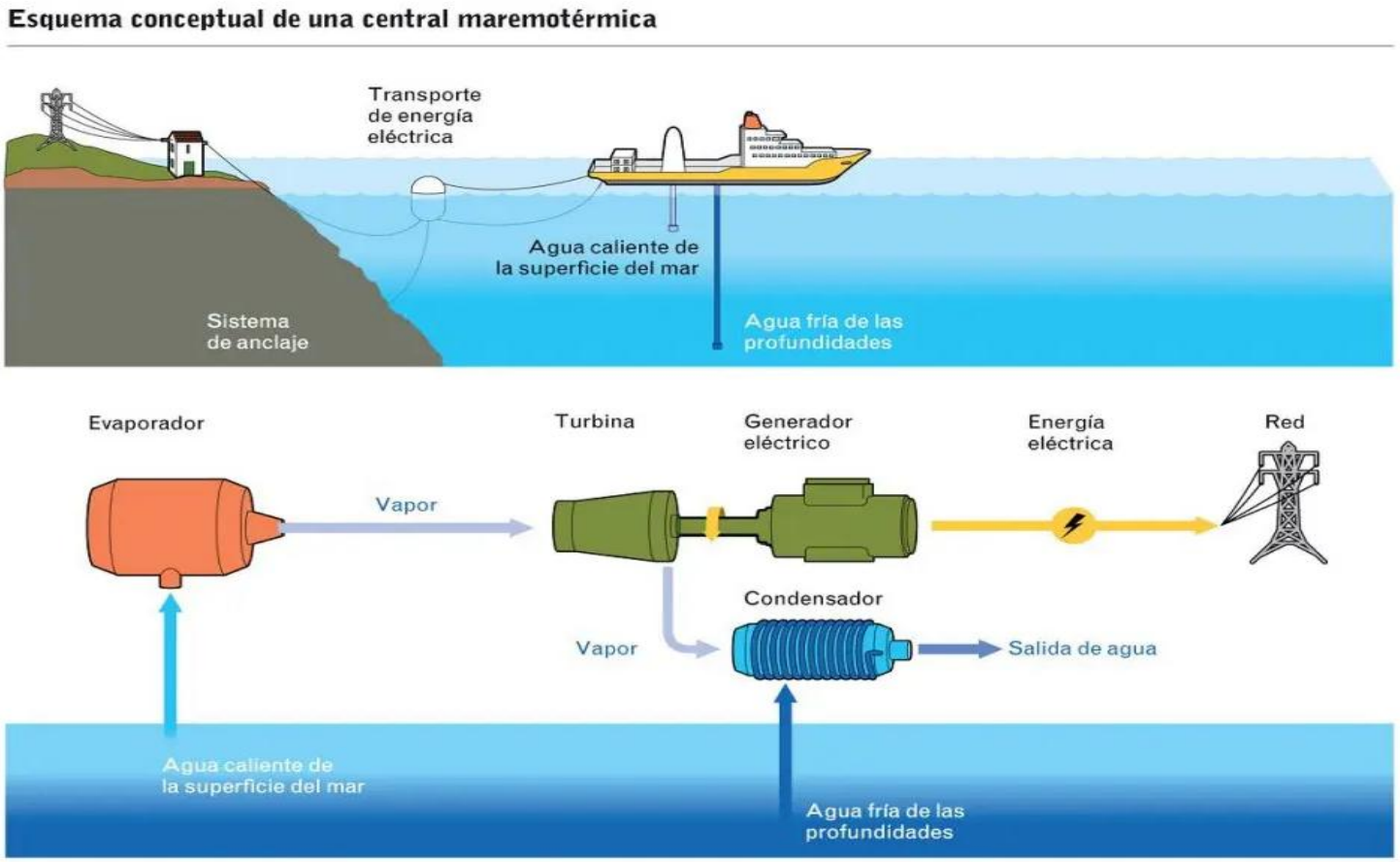


Referencia: (MeyGen // Nova Scotia, s.f.)

Maremotérmica

La energía maremotérmica, también conocida como Conversión de Energía Térmica-Oceánica (C.E.T.O), en contraste con las tecnologías olamotriz y mareomotriz que aprovechan la energía cinética y potencial de las olas y mareas, la generación maremotérmica es un tipo de conversión energética mediante un ciclo termodinámico. Se basa en la diferencia de temperaturas entre las aguas profundas, más frías, y las cercanas a la superficie, más cálidas, el agua tibia calienta un fluido de trabajo hasta convertirlo en vapor para mover una máquina térmica y producir trabajo útil, generalmente en forma de electricidad, el ciclo operativo de este tipo de centrales se muestra en la Figura 38. Una ventaja respecto a otras energías renovables es su funcionamiento 24 horas al día, sin dependencia de condiciones eólicas o solares. Con estas centrales se pueden llegar a obtener factores de carga de entre 90 y 95%, una de las más altas dentro de las tecnologías de generación existentes; por otra parte, la producción de energía se logra de manera continua y el recurso es ilimitado. No obstante, es necesario recalcar que esta tecnología se encuentra en fase de desarrollo para niveles comerciales, por lo que hace de esta una tecnología muy costosa. Igualmente, los costos se elevan aún más por el hecho de requerir tuberías y sistemas de bombas más resistentes a la corrosión.

Figura 38: Ciclo operativo de una central maremotérmica

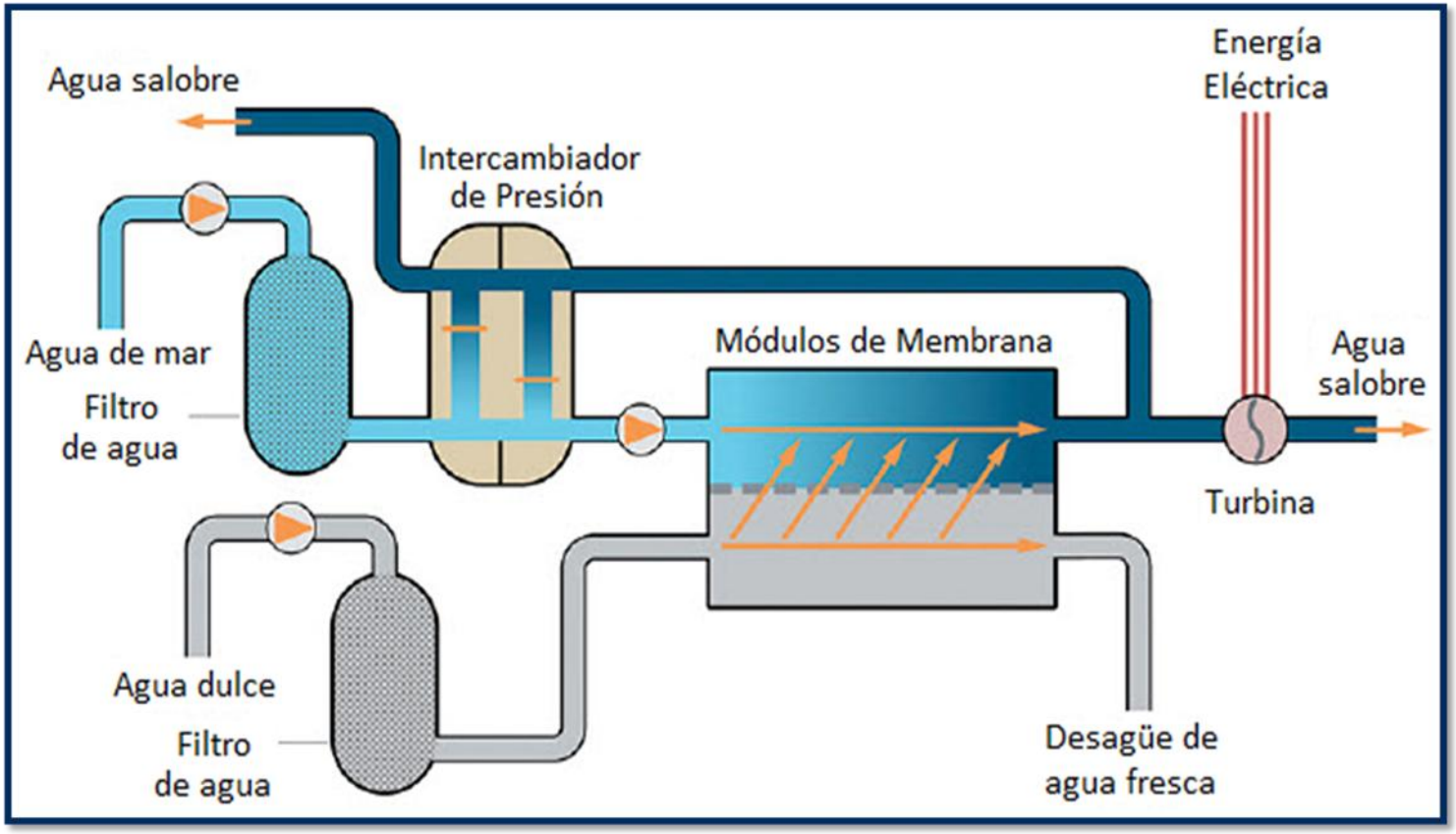


Referencia: (Renovables Verdes)

Osmótica

También conocida como energía de gradiente de salinidad y energía azul. Se basa en la diferencia de concentración de salinidad que hay entre dos cuerpos de agua, usualmente agua salada del mar y agua dulce de ríos que desembocan al mar. En la actualidad existen dos maneras de obtener energía eléctrica mediante esta tecnología: mediante ósmosis por presión retardada y la electrodiálisis invertida. En la ósmosis por presión retardada, una membrana delgada separa los reservorios de agua dulce y agua salada. El agua dulce fluye a través de la membrana semipermeable hacia el reservorio de agua salada, provocando un aumento en la presión del reservorio. Cuando la presión acumulada en dicho reservorio es considerable se hace pasar por una turbina el cual realiza la conversión de energía eléctrica. La técnica de electrodiálisis invertida; utiliza un principio físico diferente a la ósmosis por presión retardada para producir electricidad: crea una diferencia de potencial mediante el transporte de iones de sal por un grupo de membranas. Las membranas selectivamente permeables están en un arreglo de tal manera en que se produce un intercambio alternado de cationes y aniones. Asimismo, entre las membranas se encuentran compartimientos que almacenan alternadamente agua dulce y agua salada, garantizando así el gradiente de salinidad como se muestra en la Figura 39. A pesar de ser una tecnología muy innovadora, aún se requiere de mucha inversión en investigación y desarrollo para ser competitiva comercialmente con otras fuentes renovables. Los principales retos aunados a esta tecnología son el mejoramiento del diseño y calidad de las membranas para tener alta durabilidad en los procesos de conversión energética, así también como el desarrollo de los módulos que contienen las membranas, y el pretratamiento del agua.

Figura 39: Ciclo operativo de una central osmótica por presión invertida



Referencia: (National Renewable Energy Laboratory, 2012)

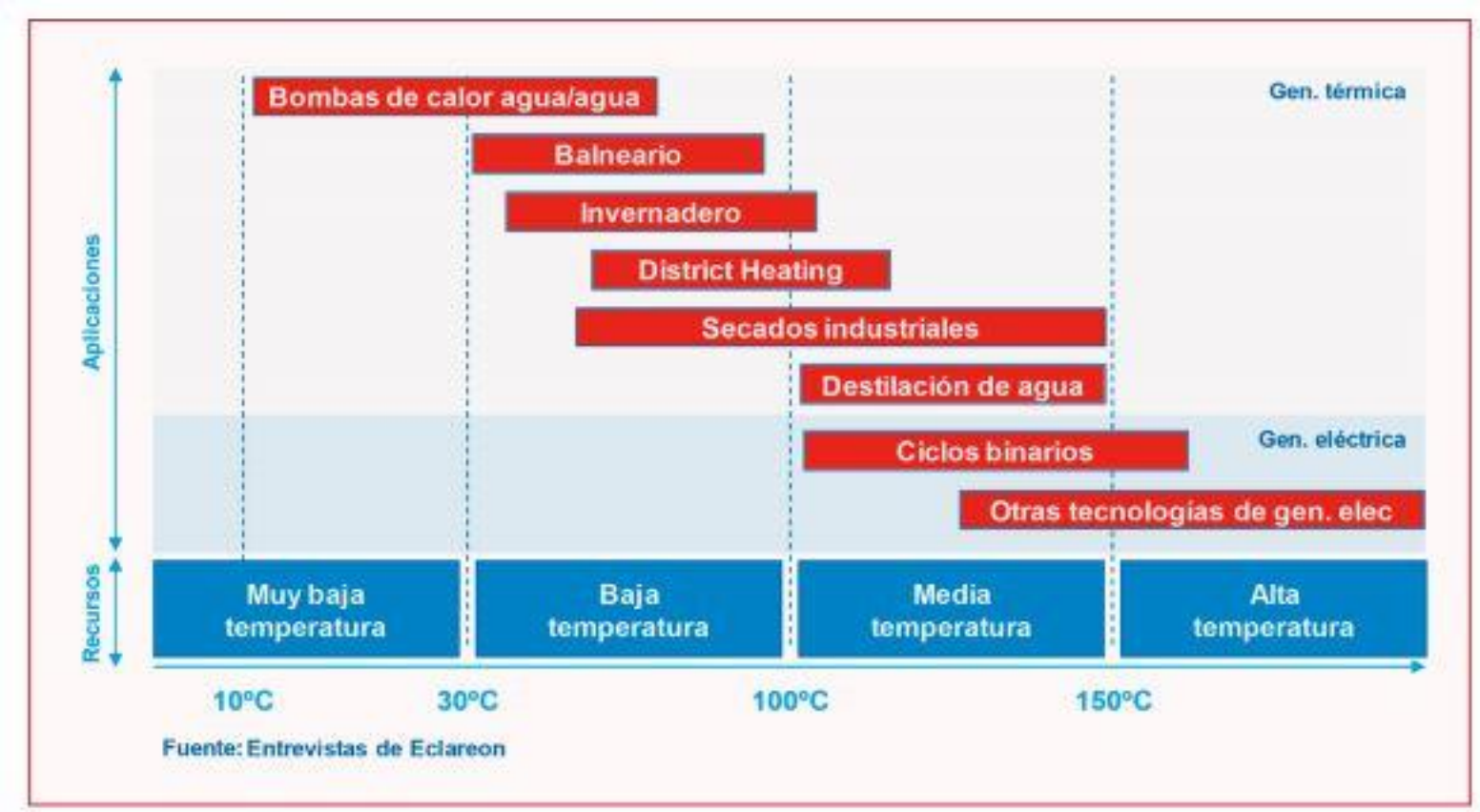
Las centrales geotérmicas aprovechan el potencial energético de algún tipo de fluido de trabajo proveniente de reservorios encontrados bajo tierra para el uso indirecto de producción de energía eléctrica y/o uso directo. El uso directo no involucra conversiones de energía térmica a eléctrica, por consiguiente, ésta es utilizada para calefacción y/o enfriamiento de recintos, procesos industriales y agrícolas.
La alta temperatura de la energía geotérmica se encuentra en zonas activas de la corteza. El vapor llega a la superficie y mediante una turbina se puede generar la electricidad.
Con todo, se necesita que haya condiciones favorables regidas por ciertos parámetros para que se dé la posibilidad de un campo geotérmico.

En la Figura 40 pueden observarse algunas de las aplicaciones más comunes para el cual el potencial geotérmico es aplicado y su rango de temperatura. Para describir una central geotérmica tenemos que comenzar diciendo que se trata de una zona "sembrada" de grandes tuberías, que conducen el vapor desde los pozos geotérmicos hasta las plantas generadoras.

Otras tuberías extraen vapor de los pozos. Las cañerías tienen forma de curvas a intervalos regulares que hacen posible que los enormes tubos se expandan y contraigan al calentarse y enfriarse. Actualmente existen tres tipos de configuraciones de centrales geotérmicas, y la selección de éstas depende del estado del fluido de trabajo (vapor o agua) y sus temperaturas. En las siguientes secciones se explican cada una de las configuraciones con mayor detalle.

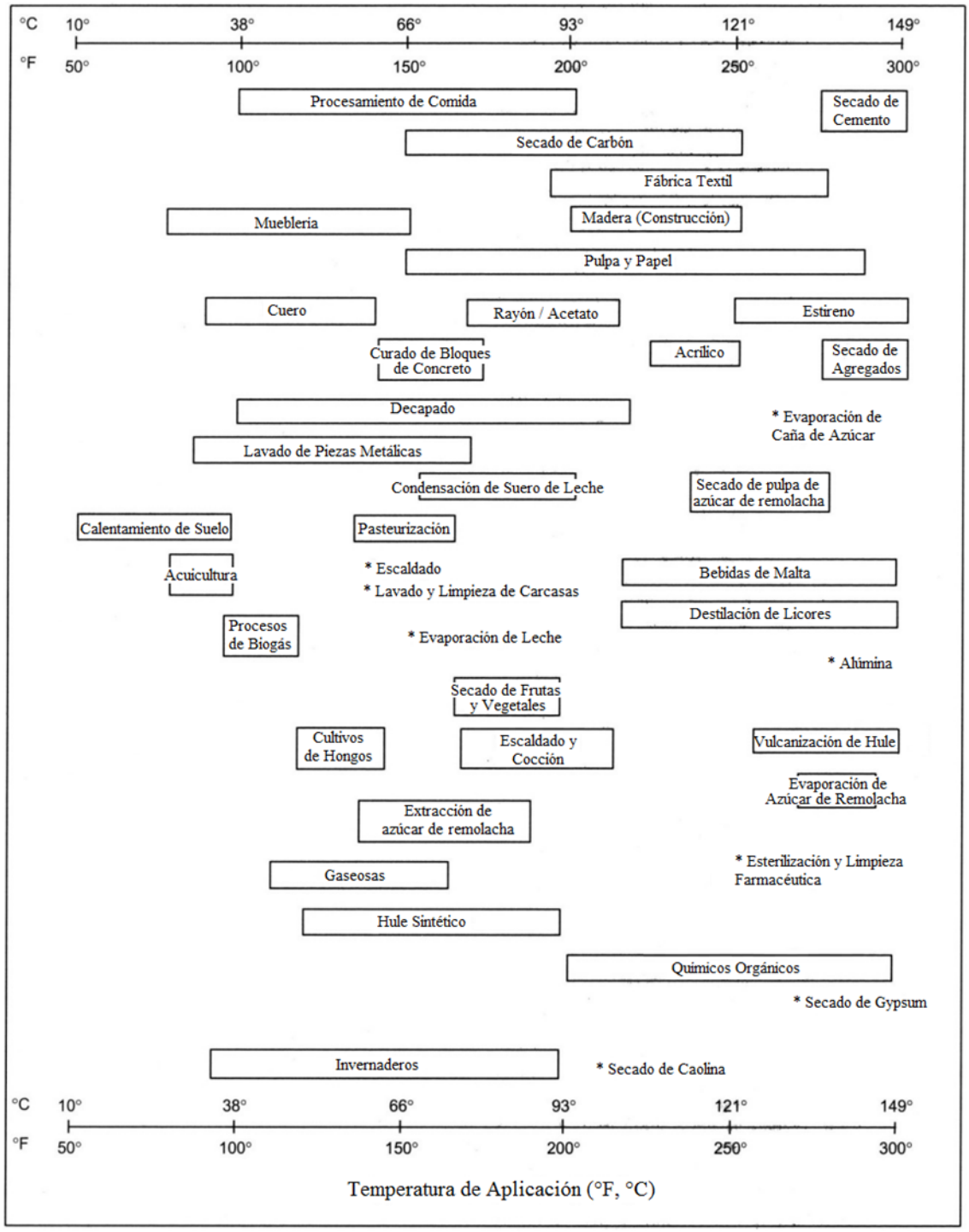
En la Figura 41 se puede observar los usos directos de la energía geotérmica tanto industriales como agrícolas con sus respectivos rangos de temperatura.

Figura 40: Diagrama Lineal de temperatura de agua y vapor geotérmico recomendado para diversas aplicaciones



Referencia: (Caloryfrio, 2016)

Figura 41: Usos directos del recurso geotérmico: Rangos de temperatura de algunos procesos industriales y aplicaciones agrícolas

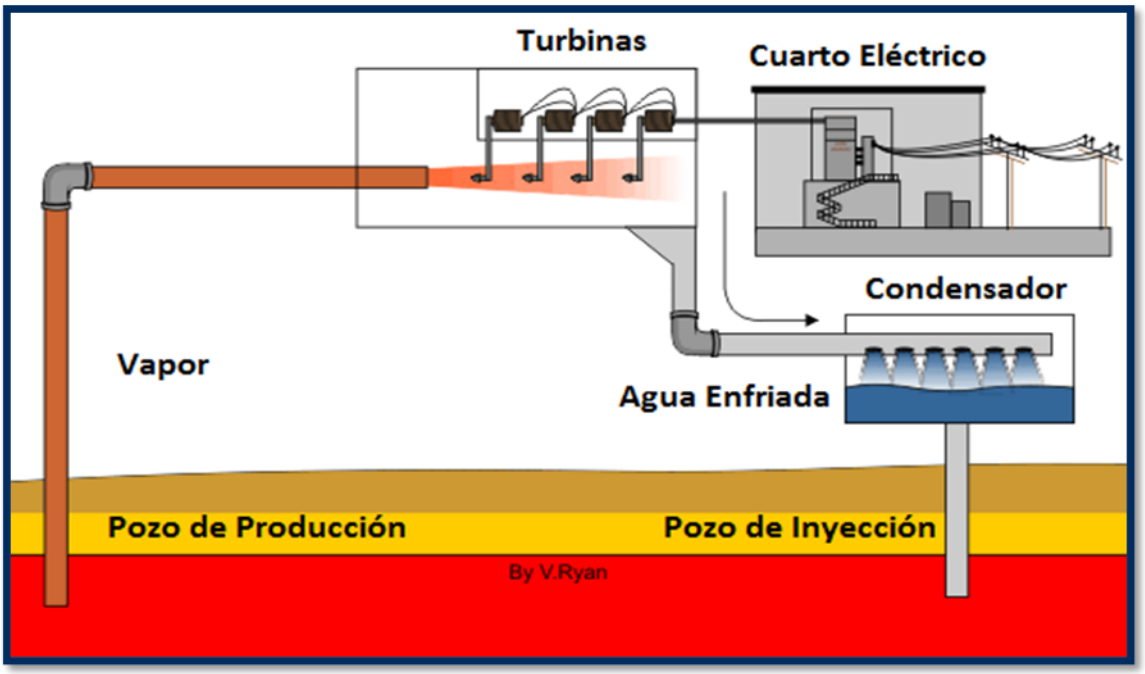


Referencia: (Jóhannesson & Chatenay, 2014)

Vapor Seco

Es una de las configuraciones convencionales más antiguas, siendo la primera construida en el año 1904. Con este diseño, agua en fase de vapor sobrecalentado y de temperaturas superiores a 150°C es extraído desde los reservorios y es utilizado para impulsar las turbinas y producir energía eléctrica. Una porción del vapor es posteriormente condensado y reingresado al reservorio con la finalidad de reutilizarlo en el ciclo, mientras que la otra porción del vapor es evacuada hacia el ambiente. En la Figura 42 se presenta una configuración típica de una central geotérmica que opera con vapor seco. Centrales de generación geotérmica con este esquema tienen costos de inversión relativamente bajos en comparación con los demás esquemas; adicionalmente, son altamente eficientes, llegando a valores de entre 50% y 70%. La principal restricción para implementar esta tecnología es encontrar reservorios con buen potencial de vapor. Otros aspectos que deben tomarse en cuenta con estas centrales son las concentraciones de gases no condensables en el vapor que sean expulsados al ambiente, la alta corrosividad que puede afectar los elementos de la central.

Figura 42: Central geotérmica accionada por vapor seco



Referencia: (Save the Earth, 2016)

Vapor por Destello

Una de las configuraciones convencionales más utilizadas para la producción de energía eléctrica. A diferencia de las centrales geotérmicas de vapor seco, éstas utilizan agua en fase líquida con temperaturas mayores a 200°C y altas presiones de operación. Siguiendo el esquema de referencia de la Figura 43, el agua es bombeada y transportada a un tanque en donde la presión del fluido es reducida drásticamente, lo cual provoca el repentino cambio de fase de líquido a vapor (de ahí el nombre de destello de vapor).

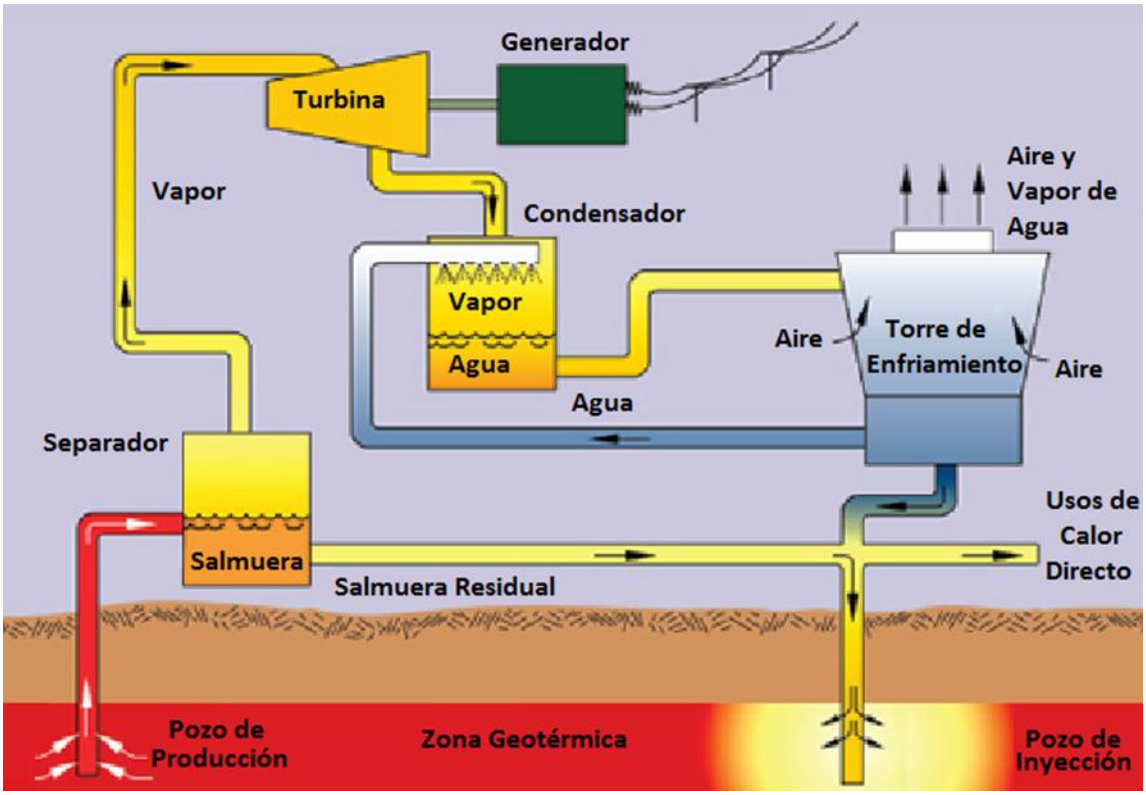
La parte del agua convertida a vapor sigue el mismo recorrido que en la configuración de una central de vapor seco; la parte del agua que se mantuvo en fase líquida se combina con el condensado del vapor usado en las turbinas para ya sea ser reinyectado al reservorio, para un segundo tanque para producir vapor por destello nuevamente y generar más electricidad, o algún uso directo de calor. Las eficiencias energéticas globales son función de las veces que el fluido es destellado y si éste es utilizado para otros procesos aparte de el de la producción de generación eléctrica: si se destella una vez, eficiencias se encuentran entre 30% y 35%; si se destellan dos veces, 35% y 45%.

Si se agregan intercambiadores de calor para el proceso de producción de agua caliente, la eficiencia global es incrementada gradualmente.

Centrales geotérmicas de vapor por destello sencillo requieren de un bajo costo de inversión, pero para poder ser competitivas deben disponer de un recurso geotérmico a temperaturas superiores a los 200°C; por otra parte, centrales con destello doble demandan mayor costo de inversión y para ser competitivas deben contar con el recurso geotérmico a temperaturas superiores a los 240°C.

Independientemente de la cantidad de veces que sea destellado el vapor, los costos de operación y mantenimiento aumentan considerablemente si el recurso tiene una alta concentración de minerales.

Figura 43 : Central geotérmica accionada por destello de vapor de una etapa



Referencia: (The National Academies Press, 2013)

Ciclo Binario

Es la configuración más reciente e innovadora dentro del grupo y se espera que futuras instalaciones de centrales geotérmicas adopten este arreglo ya que operan con el ciclo Rankine orgánico o también con el ciclo Kalina. El agua está a temperaturas cercanas a 60°C son transportadas a un Figura 44 permite visualizar mejor el principio de funcionamiento del ciclo. En comparación con las tecnologías antes mencionadas, éste es un ciclo cerrado, lo cual significa que los fluidos primarios y secundarios no se mezclan durante el proceso y esto conlleva a una disminución en las evacuaciones de vapor y gases nocivos al ambiente virtualmente nulas.

intercambiador de calor en donde se transfiere su energía a un fluido de trabajo secundario con una temperatura de ebullición muy inferior que la del agua, causando que éste cambie de fase líquida a vapor y sea el que impulse las turbinas. La

Adicionalmente, no se requiere que las temperaturas del agua proveniente del reservorio sean tan elevadas. Una gran desventaja de este ciclo de operación es que la eficiencia del sistema es ligeramente inferior a las demás técnicas. Por ejemplo:

- Usando el ciclo Rankine Orgánico se pueden alcanzar eficiencias entre 25% y 45%.
- Con el ciclo Kalina pueden obtenerse eficiencias entre el 30% y 65%.

Los costos de operación y mantenimiento para una central de ciclo Rankine Orgánico son muy elevados debido a que el recurso contiene una mayor concentración de salinidad que puede afectar los elementos de la planta. En contraste, los costos de inversión y la complejidad tecnológica son muy elevados para centrales que utilizan el ciclo Kalina debido a que este esquema es relativamente nuevo.

La reducción de los costos de inversión para centrales con el ciclo Kalina la harán más competitiva contra la del ciclo Rankine Orgánico solamente cuando haya se efectúen más estudios de diseño y desarrollo.

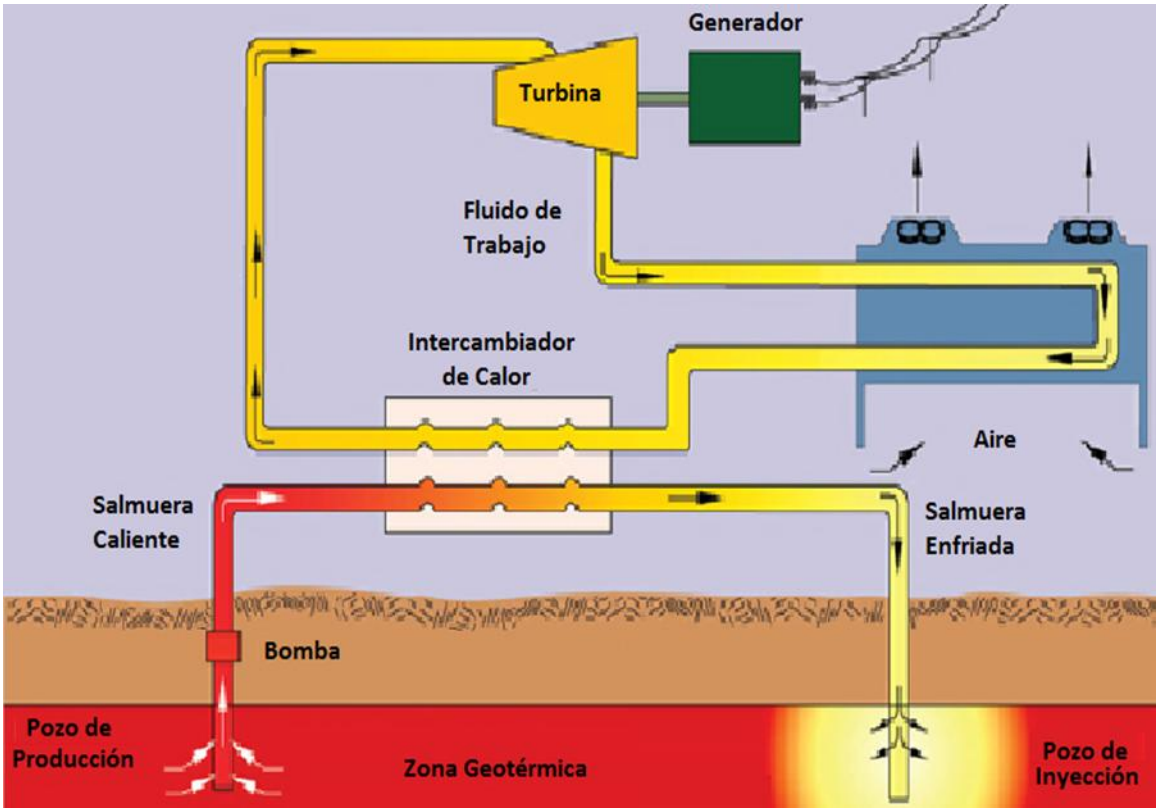
Las centrales geotérmicas superan a las centrales térmicas que utilizan recursos no renovables (combustibles fósiles) en los siguientes aspectos:

- Cuentan con recurso energético confiable, abundante y renovable puesto que el agua puede ser reingresada al reservorio para producir más vapor.
- Reducción en el espacio físico de la central generadora ya que no se requiere de un depósito para el almacenamiento del combustible.
- Sus costos efectivos son más baratos debido a que no dependen de las variaciones de los precios del combustible.
- Las emisiones de gases de efecto invernadero son menores.

A pesar de las ventajas descritas anteriormente, la producción de energía eléctrica mediante esta tecnología lleva integrado intrínsecamente las siguientes desventajas:

- La producción de energía puede verse limitada por el agotamiento del recurso hídrico en los reservorios.
- Los respiraderos naturales no son accesibles en su totalidad y solamente lo están en ubicaciones selectas. Por otra parte, los respiraderos artificiales son muy lejanos y profundos en la tierra para ser lo suficientemente efectivos.

Figura 44 : Central geotérmica de ciclo binario de una etapa



Referencia: (The National Academies Press, 2013)

La piezoelectricidad es una propiedad que tienen ciertos cristales de polarizarse eléctricamente cuando son sometidos a presión, y a la inversa. Esta propiedad es aprovechada por la empresa Pavegen que desarrolla aceras que convierten los pasos en electricidad, con un diseño de acera formada por un pavimento especial componiéndose de baldosas triangulares como se puede observar en la Figura 45 en las cuales cada esquina contiene un generador electromagnético, que se comprime cuando alguien pasa por encima. Al realizar este movimiento hacia abajo y hacia arriba se genera la electricidad. Tiene distintas aplicaciones a parte de la recolección de electricidad, como para encender luces, mecanismos, ser almacenada en baterías, respuestas sonoras, ect.

Figura 45: Baldosa piezoeléctrica Pavegen



Referencia: (Plataforma Arquitectura, 2019)

TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

El sistema de energía eléctrica debe abordar dos requisitos únicos: la necesidad de mantener un equilibrio casi en tiempo real entre la generación y la carga, y la necesidad de ajustar la generación (o carga) para administrar los flujos de energía a través de las instalaciones de transmisión individuales.

La demanda eléctrica es la suma de los requisitos de energía de miles de usuarios diferentes, desde hogares individuales hasta grandes empresas industriales y comerciales, todos los cuales pueden cambiar las cargas, con magnitudes muy diferentes, en horarios convenientes para cualquier actividad que realicen en el momento.

Esperan que la energía esté disponible a pedido y no consultan a la empresa de servicios públicos para advertirles con anticipación.

Debido a los impactos ambientales notorios en la actualidad, el almacenamiento de electricidad juega un papel crucial en la búsqueda de una matriz energética con más fuentes de energía renovable. Junto con el impulso de generación de energía solar y eólica, se permite la aguda descarbonización en segmentos clave del mercado energético.

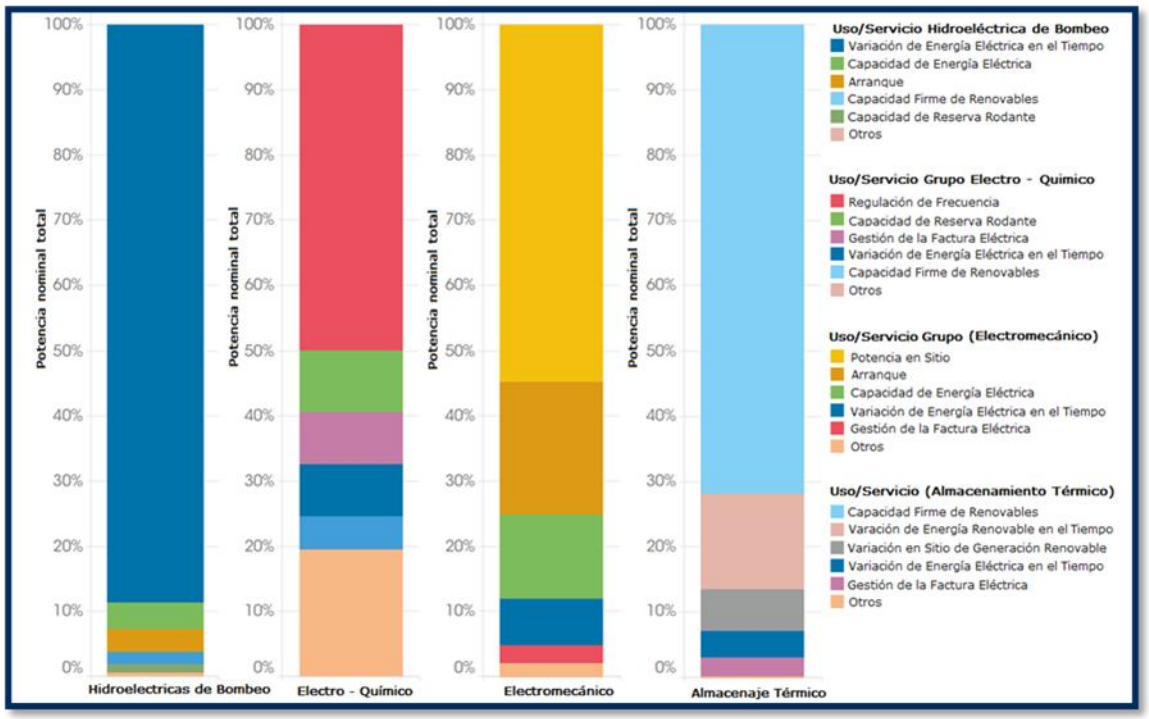
Las tecnologías de producción de energía renovables no convencionales dependen de la disponibilidad momentánea del recurso, por lo que son consideradas como fuentes intermitentes. Con la finalidad de mitigar tal variabilidad, se recurren a los sistemas de acumulación de energía, los cuales permiten almacenar la energía en el momento en que se tiene disponible y posteriormente utilizarla cuando sea necesario.

La capacidad de almacenamiento de electricidad puede reducir las restricciones en la red de transmisión y puede aplazar la necesidad de grandes inversiones en infraestructura. Esto también se aplica a la distribución, independientemente de si las restricciones reflejan el crecimiento en energías renovables o un cambio en los patrones de demanda.

Dependiendo de la duración de la falta de coincidencia, el suministro inmediato se mantiene mediante la llamada "reserva rodante" o baterías hasta que un generador alternativo a más largo plazo entre en funcionamiento para asumir la carga.

Para satisfacer esta demanda, el sector eléctrico debe evaluar una gama de activos "lentos" y "rápidos" optimizados para satisfacer los componentes fijos y variables de la demanda y de sus necesidades, pero generalmente se necesitan activos de almacenamiento con acción particularmente rápida, que proporcionen la flexibilidad necesaria para enfrentar este desafío. Esto se muestra en la Figura 46.

Figura 46 : Capacidad Global de almacenamiento de Energía por Uso y Tecnología.



Referencia: (Irena Electricity Storage Cost, 2017)

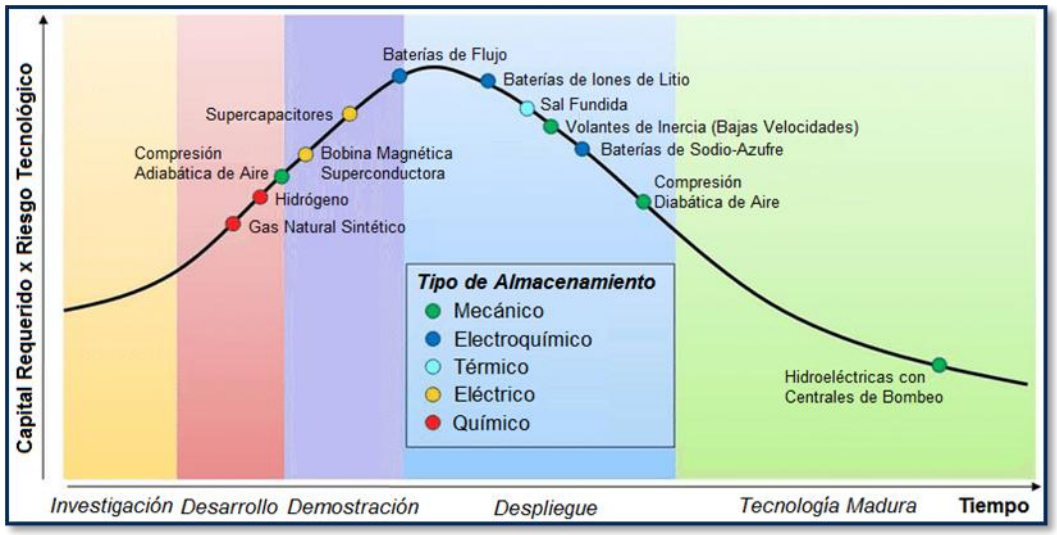
En función de la tecnología de generación de energía eléctrica, se presentan en las siguientes secciones las diferentes alternativas disponibles de sistemas de acumulación de energía. La Figura 47 presenta un resumen de las tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica; análogamente, en la Figura 48 se muestra la curva de madurez de las tecnologías de almacenamiento de energía. La Figura 49 y la Figura 50 son las comparaciones por tecnología en base al tiempo de descarga y a la densidad de energía y de potencia respectivamente.

Figura 47 : Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica



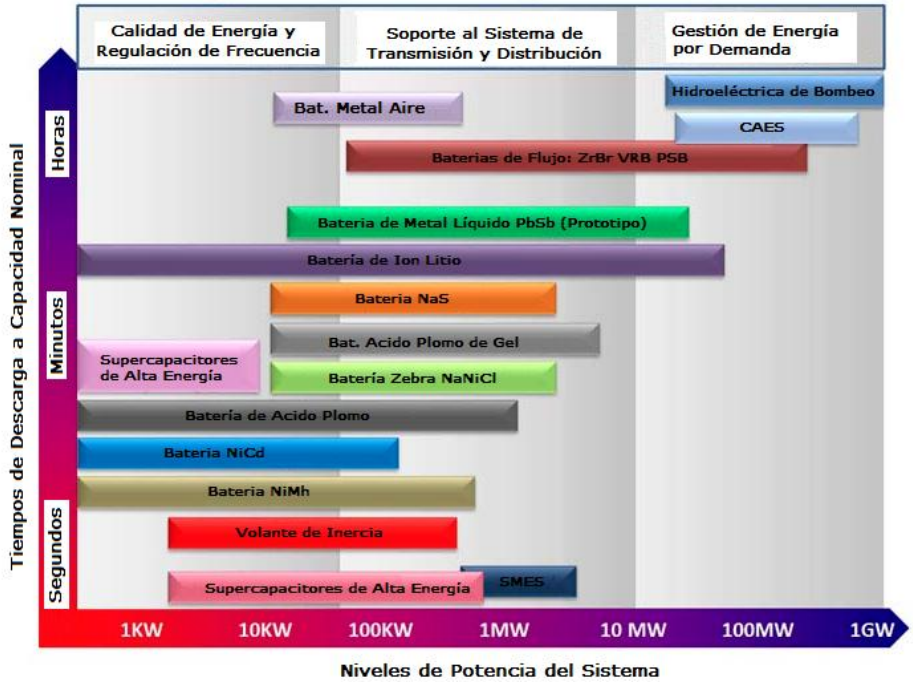
Referencia: (MITECO, 2021)

Figura 48: Curva de madurez de tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica



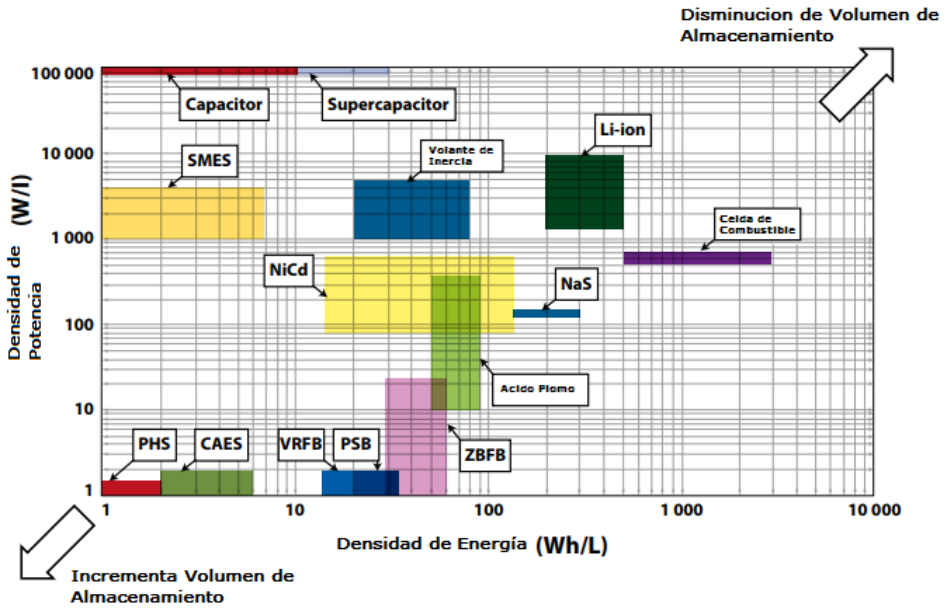
Referencia: (Scottish Renewables, 2016)

Figura 49: Gráfico de Comparación de Tiempos de Descarga por Tecnología



Referencia: (Irena Electricity Storage Cost, 2017)

Figura 50: Comparación mediante densidades de energía y potencia por Tecnología



Referencia: (Irena Electricity Storage Cost, 2017)

Hidroeléctricas con Centrales de Bombeo

El bombeo hidráulico es un sistema de almacenamiento muy desarrollado y utilizado para producción de energía a gran escala, el cual, es su único fin, y se combina muy fácilmente con sistemas eólicos, donde la energía sobrante se utiliza para revertir el agua. Son centrales hidroeléctricas que tienen dos reservorios a diferentes elevaciones, en el cual se bombea agua durante horas valle desde el reservorio inferior hacia el reservorio superior.

En horas pico o cuando sea requerido por el sistema, el agua es turbinada desde el reservorio superior hacia el inferior para producir energía eléctrica. Mientras que los reservorios superiores son usualmente los mismos embalses o un embalse a mayor altura, existen varias alternativas técnicamente viables para los reservorios inferiores: pozos de minas inundadas, cavernas u otras cavidades subterráneas, e incluso el mar abierto. De ser posible, es recomendable que el reservorio inferior sea subterráneo, ya que se logra evitar la evaporación del agua.

Este tipo de centrales hidroeléctricas son reversibles, ya que los generadores pueden operar como motores, y las turbinas como bombas. Bajo esta configuración de central hidroeléctrica,

En la Figura 51 puede apreciarse un proyecto desarrollado de central hidroeléctrica con bombeo. La central más grande del mundo (Bath County)

su eficiencia oscila entre un 70% y 85%: tienen un rendimiento más bajo cuando operan como bombas que como turbinas.

Las principales ventajas de estas centrales son un tiempo de vida más extendido y la disposición del recurso virtualmente inagotable; por otra parte, las mayores limitaciones de las centrales son una gran dependencia de las condiciones topológicas y un mayor uso requerido de tierra inundable. En cuanto a problemas operativos se han identificado:

- Problemas de cavitación: la casa de máquinas debe ubicarse de tal manera que la bomba opere sumergida en todo momento.
- El cambio de dirección del flujo del agua incrementa la probabilidad de agrietamiento debido a fatiga en la estructura.
- El flujo del agua durante el modo de bombeo tiende a elevar la máquina axialmente, provocando mayores esfuerzos de tensión en cojinetes.
- Las parrillas retenedoras de basura sufren de vibraciones extremas en modo de bombeo.

tiene una capacidad instalada de 2100 MW está ubicada en Virginia, Estados Unido.

Figura 51: Central Hidroeléctrica con Bombeo de agua dulce Rocky Mountain (1095 MW), ubicada en el estado de Georgia, Estados Unidos.



Referencia: (Canary Systems, 2016)

Aire líquido

También conocido como LAES (Liquid Air Energy Storage), este sistema emplea el aire líquido como vector energético y puede integrarse en procesos de calor y frío residual industriales. El proceso se lleva a cabo en una planta de licuefacción de aire industrial que emplea energía eléctrica para enfriar el aire ambiente, hasta producir aire líquido (criogénico) que se almacena en un tanque aislado a baja presión. Cuando se requiere energía, el aire líquido es presurizado, re-gasificado y expandido en una turbina para generar electricidad. Este almacenamiento puede acompañarse de dos sistemas de almacenamiento térmico asociados a cada uno de los procesos de compresión y expansión de aire (foco frío y caliente). La implementación de estos sistemas permite incrementar la eficiencia de la conversión.

Aire Comprimido

El almacenamiento de energía mediante aire comprimido o CAES (Compressed Air Energy Storage) consiste en almacenar aire a altas presiones de 60-70 bar en cubículos bajo tierra. Dicho aire se presurizará de forma progresiva con enfriamientos intermedios en el proceso para lograr un mayor rendimiento de energía en periodos donde se posea energía excedente. La compresión de aire se realizará normalmente en las horas de bajo consumo (horas valle) para

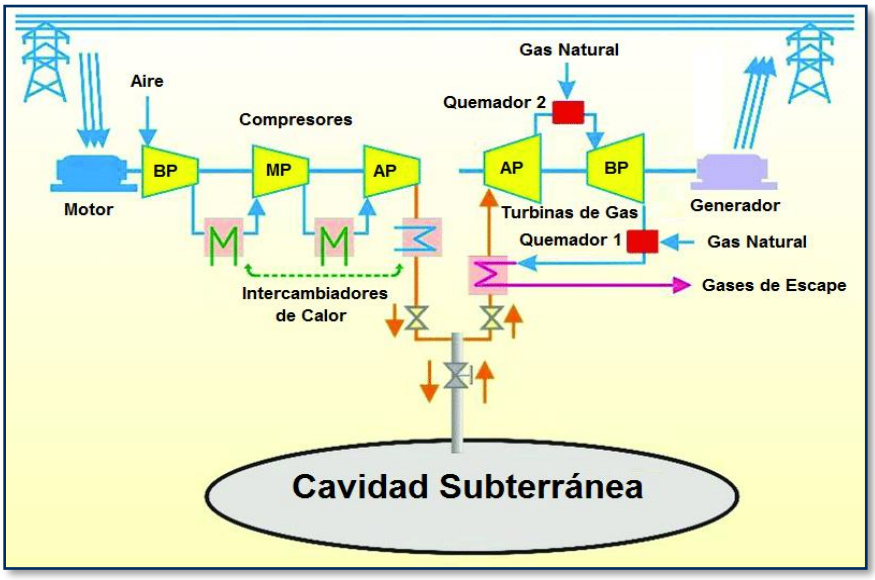
después producir energía en las horas pico. Posteriormente mezclarlo con gas natural, quemarlo y expandirlo en una turbina de gas modificada y producir energía eléctrica en las horas de demanda pico.

Existen actualmente dos tipos de compresión: diabática y adiabática; la primera alternativa ha sido implementada y demostrada desde el siglo XIX, mientras que la última se encuentra en fase de desarrollo. En un proceso de compresión diabática, el calor liberado durante la compresión es disipado por enfriamiento y éste no se almacena, por lo que el aire debe recalentarse previamente para su expansión en la turbina. En contraste, en un proceso de compresión adiabática, el calor liberado durante la compresión del aire es almacenado en un depósito térmico (por ejemplo, rocas porosas) y utilizado durante su expansión en la turbina.

En la mayoría de las ocasiones estos compartimentos donde se almacena el aire son antiguas minas, pozos petrolíferos o de gas natural o acuíferos, lo cual permite un almacenaje de aire masivo y sin los enormes costes que supondrían la realización del cubículo subterráneo.

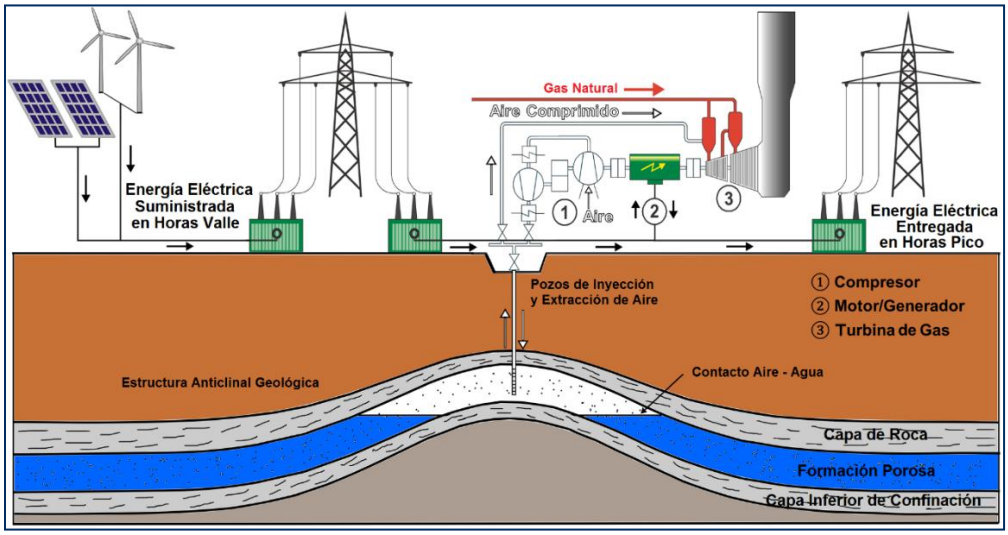
La principal ventaja de estas centrales es su gran capacidad de almacenamiento; sin embargo, se restringen por su baja eficiencia global (menores a 50%) y por su disponibilidad geográfica. En la Figura 52 y Figura 53 se puede observar los esquemas de funcionamiento.

Figura 52: Central con almacenamiento por compresión diabática de aire.



Referencia: (Huang, y otros, 2017)

Figura 53: Central con almacenamiento por compresión adiabática de aire.



Referencia: (Wang & Bauer, 2017)

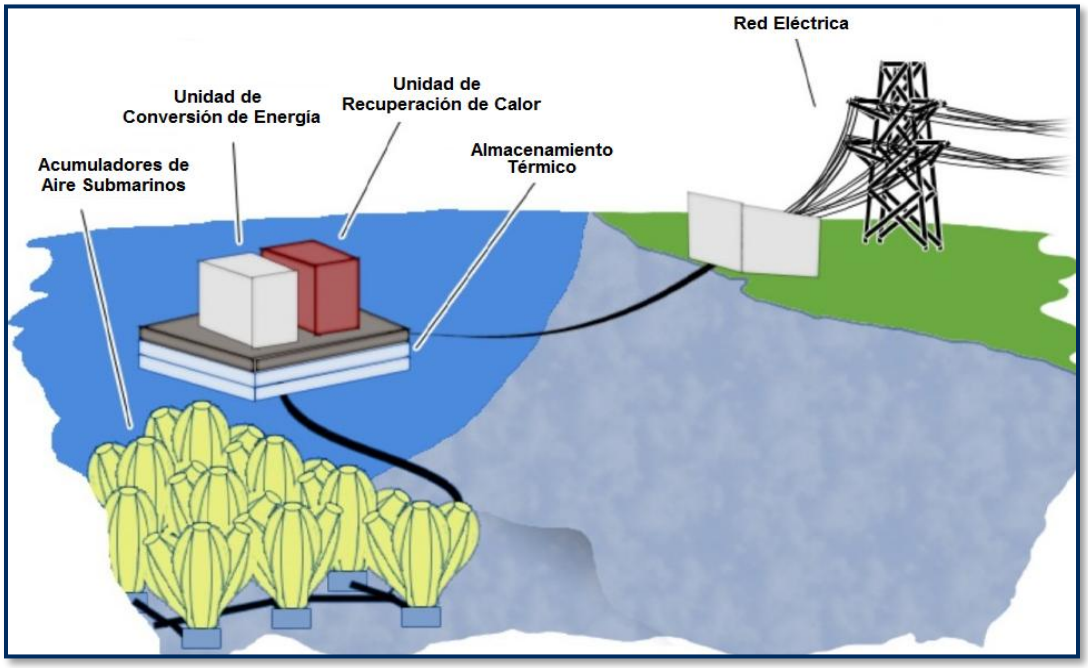
Una innovadora alternativa de almacenamiento de energía por compresión de aire ha sido implementada: compresión submarina de aire. La idea consiste en aprovechar los principios y conceptos termodinámicos y mecánica de fluidos en un sistema de almacenamiento submarino: el almacenamiento del aire comprimido se da en acumuladores flexibles instalados cerca del fondo de lagos y océanos.

A medida que el aire ingresa, los acumuladores se expanden como un globo; la presión de diseño del aire dentro del acumulador se iguala a la presión hidrostática ejercida por el agua que rodea el acumulador, lo cual mantiene el aire comprimido en el acumulador incluso cuando éste se encuentra parcialmente lleno.

Esta alternativa resulta ser muy ventajosa en comparación con el uso de contenedores rígidos que experimentan una reducción en la presión a medida que el volumen de aire almacenado disminuye. En otras palabras, el aire comprimido en sistemas submarinos mantiene una presión constante independientemente del volumen.

Adicionalmente, durante el proceso de compresión del aire, el calor es almacenado en una plataforma cercana hasta por ocho horas antes de ser utilizado en el ciclo de descarga. Cada uno de estos principios físicos contribuyen a una mejora en la eficiencia global del ciclo de un 60% hasta un 80%. Se puede observar un diagrama de este sistema en la Figura 54.

Figura 54 : Sistema de almacenamiento de energía por compresión submarina de aire.



Referencia: (Windpower Engineering & Develpment, 2014)

Almacenamiento de Aire Comprimido Isotérmico

La energía se puede almacenar en aire comprimido, con pérdidas mínimas de energía, y liberarse cuando más tarde se deja expandir el aire al igual que muchos almacenamientos de energía de aire comprimido tradicional, almacenan energía en formaciones geológicas subterráneas como las cavernas de sal. Sin embargo, en estos sistemas isotérmicos, el aire se calienta cuando se comprime y se enfría cuando se expande.

Los sistemas de aire comprimido convencionales generalmente utilizan turbinas de combustión de gas para recalentar el aire enfriado antes de expansión. Este proceso crea ineficiencias y emisiones.

El sistema ICAES (isothermal compressed air energy storage) captura el calor de la compresión en el agua y almacena la captura el calor hasta que se necesita nuevamente para la expansión. El almacenamiento del calor capturado elimina la necesidad de una turbina de combustión de gas y mejora la eficiencia. Así se logra el ciclo isotérmico combinando innovaciones patentadas con un control de diseño en componentes y principios industriales. Esto lo podemos observar en la Figura 55.

Figura 55 : Almacenamiento de Aire comprimido Isotérmico de la Compañía SustainX



Referencia: (Isothermal Compressed Air Energy Storage, 2012)

Volantes de Inercia

El volante de inercia es un elemento capaz de almacenar la energía en forma de cinética mediante una rotación, la cual será liberada en el momento que sea necesario. Los volantes se cargan y descargan gracias a la acción de una máquina eléctrica que actúa como motor o generador y gracias a esta máquina y utilizando la energía proporcionada por la red eléctrica provocamos el movimiento del rotor del volante hasta alcanzar su velocidad nominal (proceso de carga).

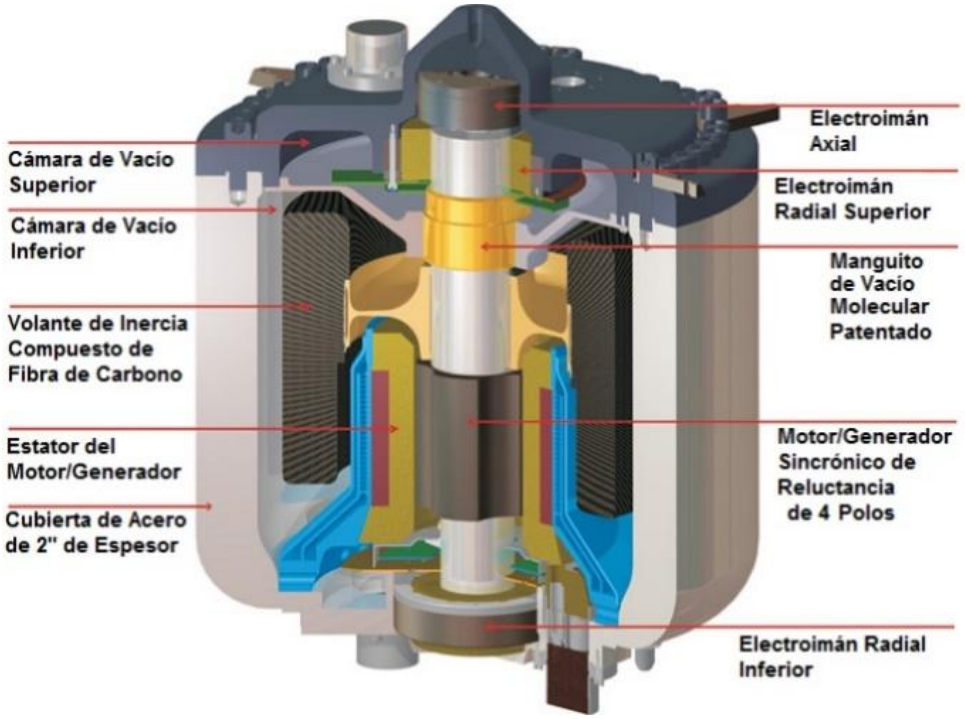
Después la energía mecánica almacenada se transformará en el momento de su utilización a energía eléctrica mediante el generador, disminuyendo en el proceso la velocidad del rotor del volante hasta su valor mínimo de diseño. Luego se transformará a corriente alterna mediante un inversor y un sistema de control se encargará de controlar los valores de utilización.

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

- Volante de inercia a bajas velocidades: $< 6x10^3$ rpm, su principal uso es en aplicaciones de calidad de energía (regulación de frecuencia, y sistemas de alimentación ininterrumpida).
- Volantes de inercia a altas velocidades: $10^4 - 10^5$ rpm, su principal uso es en aplicaciones de la industria del transporte (vehículos híbridos) e industria aeroespacial (satélites y catapultas en portaviones).

Entre las ventajas de implementar volantes de inercia como acumuladores de energía se pueden mencionar un mantenimiento reducido, densidad de potencia alta, larga vida útil, excelente estabilidad en los ciclos de carga/descarga y el uso de materiales ambientalmente inertes. Un diseño de volante de inercia se muestra en la Figura 56.

Figura 56: Volante de inercia de cuarta generación.



Referencia: (Powerthru, 2016).

SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO ELECTROQUÍMICOS

Esta sección describe el principio de funcionamiento de una gran variedad de baterías; pueden clasificarse principalmente en dos grupos: baterías secundarias y de flujo.

Baterías Secundarias

Son baterías recargables utilizadas como respaldo ante interrupciones en el suministro de energía a una carga eléctrica, mitigación de fluctuaciones energéticas provenientes de centrales eólicas, y sistemas aislados con paneles solares fotovoltaicos; usualmente están dispuestas en bancos, e inclusive en subestaciones de almacenamiento. En la actualidad existen subestaciones de este tipo en Estados Unidos, Canadá, Alemania, Australia, Indonesia, China y Japón; el proyecto de mayor capacidad instalada fue construido en Abu Dhabi (Figura 57), son 15 sistemas, en diez ubicaciones distintas, que suman 108 MW / 648 MWh, mediante baterías de sulfuro de sodio. Cada sistema es capaz de almacenar energía durante seis horas. El compromiso total incluye 12 sistemas de 4 MW y tres sistemas de 20 MW. Este es un sistema virtual ya que no

se encuentra en una sola ubicación, pero puede ser controlado de manera unitaria. En la Figura 58 se muestra el interior de los módulos de baterías e inversores, elementos importantes de las subestaciones de almacenamiento de energía. Las siguientes secciones explican las tecnologías disponibles en almacenamiento de energía con baterías secundarias

Figura 57: Sistema de Almacenamiento de 20MW ubicado en Abu Dhabi.



Referencia: (Energy Storage News, 2019)

Figura 58: Interior de un módulo de baterías (izquierda) y módulo inversor (derecha).



Referencia: (Saur Energy, 2019).

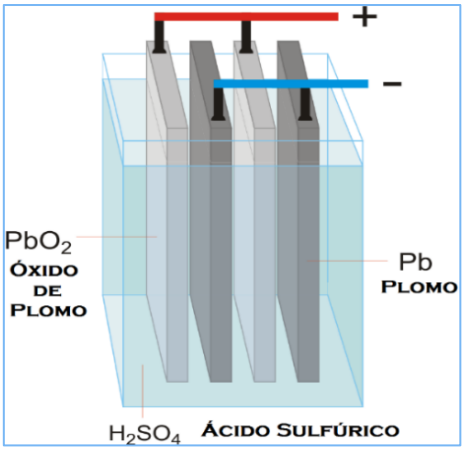
Plomo ácido

Las baterías de plomo-ácido son ampliamente utilizadas en sistemas fotovoltaicos. Además, tienen una vital importancia actualmente en aplicaciones en automóviles de motor de combustión para su utilización en el arranque del vehículo. No suele ser una opción recomendable para implantar en coches eléctricos debido a sus inconvenientes, sino que se utilizan su variante (plomo-gel).

Tiempos típicos de vida útil varían entre 6 a 15 años con unos 1500 ciclos de vida a un 80% de descarga, y se obtienen eficiencias de ciclo entre 80% y 90%. Entre sus ventajas se encuentran: una favorable razón costo/rendimiento, son fáciles de reciclar, y disponen de una tecnología simple para ser cargadas. Pese a esto, se puede mencionar entre sus desventajas que su capacidad de almacenamiento decrece cuando se descarga una gran cantidad de energía, tienen una baja densidad energética, y está el hecho de que utilizan plomo – un metal peligroso y prohibido en algunos países.

Acerca del futuro de las baterías de plomo-ácido, son más utilizadas por el aumento constante de la flota de vehículos, y debido a su precio y su disponibilidad son en muchas ocasiones una mejor opción. Además, con el surgimiento de una nueva generación de baterías de plomo ácido, cuyo rendimiento alcanza el 90%, sigue haciendo a estas antiguas baterías aún atractivas a todos los niveles de aplicación. Su estructura se muestra en la Figura 59 y en la Figura 60 se muestra un banco de estas.

Figura 59: Estructura interna de una batería de plomo ácido



Referencia: (Chemical Glossary, 2017).

Figura 60: Banco de baterías de plomo ácido



Referencia: (Storage Battery Solutions, LLC, 2018)

Níquel cadmio e hidruro metálico de níquel:

En contraste a las baterías de plomo ácido, este tipo de baterías tienen una mayor densidad energética, una densidad de potencia ligeramente superior, y un número de ciclos de vida más alto.

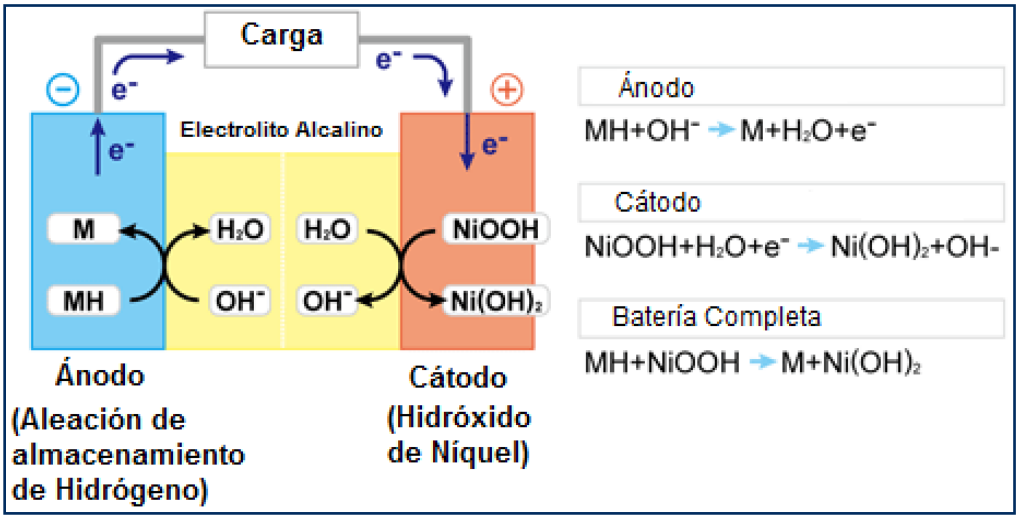
Las baterías de Ni-Cd presentan un largo ciclo de vida, más de 3500 ciclos combinados con bajos requerimientos de mantenimiento. Sin embargo, su vida útil depende principalmente de los niveles de descarga en cada ciclo, pudiendo alcanzar hasta 50.000 ciclos con un 10% de descarga.

Estas baterías requieren mantenimiento con menor frecuencia, pueden entregar más corriente en un menor tiempo y su duración es mayor con respecto a las baterías de Pb-ácido. Pueden mantener estados de descarga por periodos largos, siendo más robustas que otras tecnologías al mantener una tensión estable durante ciclos de carga/descarga profundos. Poseen una resistencia interna muy baja, por lo que son ideales para disponer en conexiones en serie.

Baterías de níquel cadmio han estado comercialmente activas desde el año 1915, mientras que aquellas de hidruro metálico de níquel desde el año 1995 (Figura 61). Debido a la alta toxicidad del cadmio, en Europa su uso fue permitido exclusivamente para aplicaciones estacionarias, y desde el 2006 han sido prohibidas para consumidores.

En la actualidad, estas baterías han sido reemplazadas por las de iones de litio, salvo para en el uso de vehículos híbridos, debido a su robustez y seguridad.

Figura 61 : Banco de baterías de níquel cadmio



Referencia: (Kawasaki, 2018).

Batería de Ion Litio

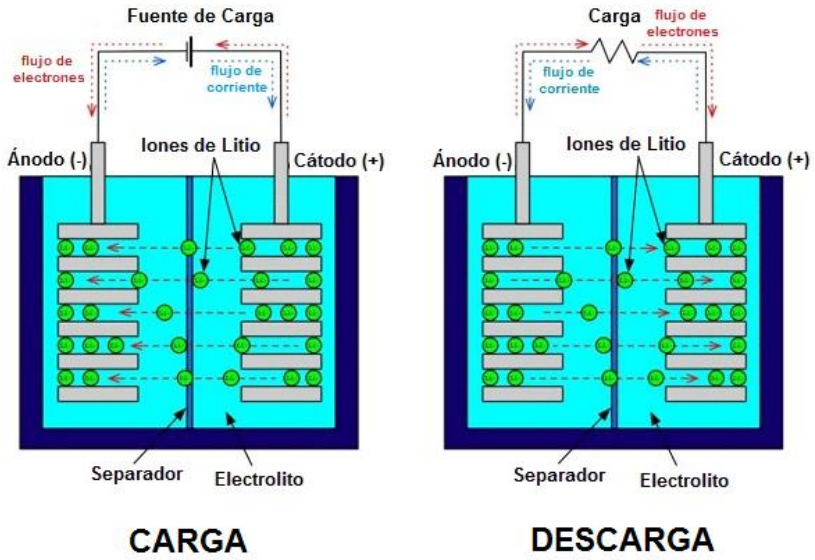
La batería de iones de litio, también denominada batería Li-Ion, es un dispositivo diseñado para almacenamiento de energía eléctrica que emplea como electrolito, una sal de litio que procura los iones necesarios para la reacción electroquímica reversible que tiene lugar entre el cátodo y el ánodo.

Las propiedades de las baterías de Li-ion, como la ligereza de sus componentes, su elevada capacidad energética y resistencia a la descarga, la ausencia de efecto memoria o su capacidad para operar con un elevado número de ciclos de regeneración, han permitido el diseño de acumuladores livianos, de pequeño tamaño y variadas formas, con un alto rendimiento, especialmente adaptados para las aplicaciones de la industria electrónica de gran consumo. Poseen una mayor densidad energética y una reducción considerable en costos por medio de producciones en masa.

Adicionalmente, pueden llegar hasta 5000 ciclos de vida, son altamente eficientes (95% - 98%) y tienen la flexibilidad de tiempos de descarga desde segundos hasta semanas.

Los problemas de seguridad más frecuentes asociados a esta tecnología son las fallas estructurales de los aislantes debido a sobrecargas o sobre descargas, causando calentamiento en los materiales activos debido a la reacción exotérmica acumulando presión y una subsecuente explosión de la batería, con riesgo adicional de combustión como resultado de la exposición al oxígeno. Su funcionamiento se puede observar en la Figura 62.

Figura 62: Funcionamiento de Batería de Ion Litio.

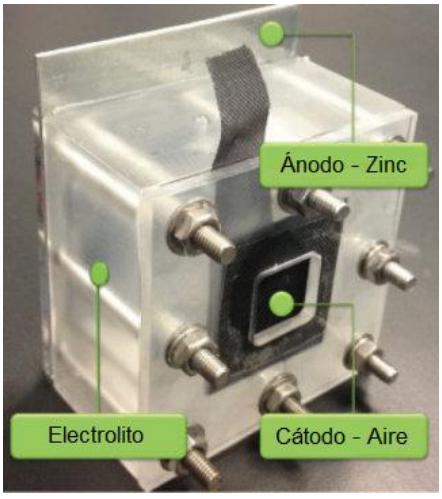


Referencia: (Apteligent, 2016).

Metal – Aire

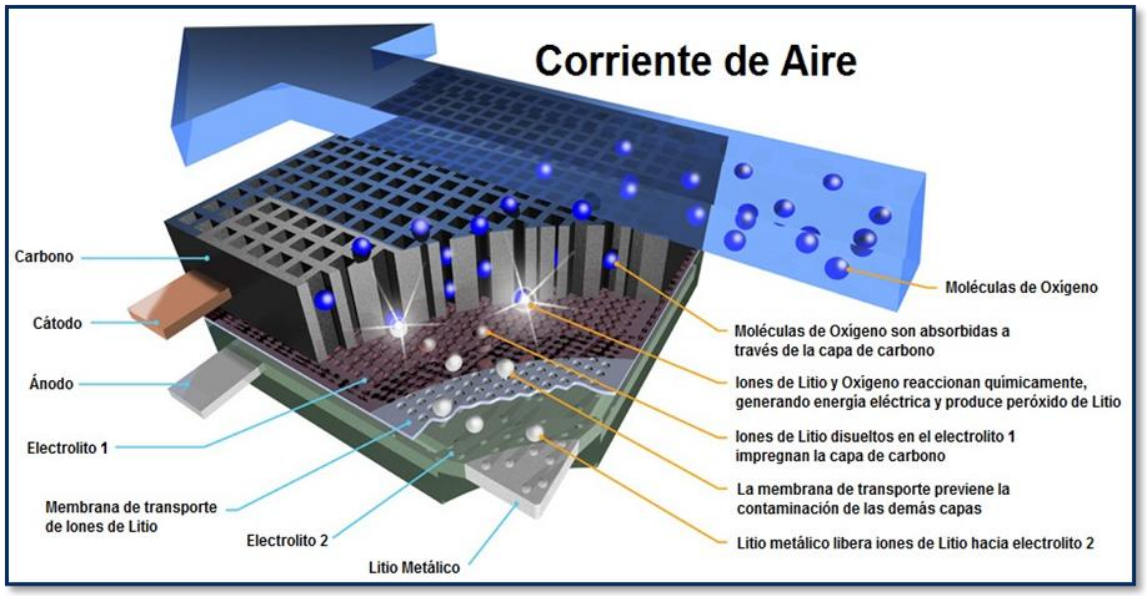
Están compuestas por un ánodo hecho de metal puro, y el cátodo conectado a una fuente inagotable de aire, en donde solamente el oxígeno presente en el aire es utilizado para producir la reacción electroquímica. Bajo esta configuración, técnicamente cualquier metal podría ser utilizado para la reacción electroquímica; sin embargo, se prefiere el uso de baterías de zinc aire sobre las de litio aire por el hecho de que el litio es muy reactivo con el aire y la humedad y puede provocar riesgos de seguridad, incluyendo explosiones e incendios. Con el zinc, la velocidad de reacción puede controlarse adecuadamente al variar el flujo de aire, y la pasta de electrolito / zinc oxidado puede sustituirse fácilmente con una pasta nueva. Una batería recargable de este tipo tiene el potencial de brindar una alta energía específica y un bajo costo de materiales; no obstante, en la actualidad ninguna batería ha alcanzado el nivel de madurez comercial. En las Figura 63 y Figura 64 se muestran respectivamente modelos de baterías de zinc aire y litio aire. Dentro de la familia metal/aire, el par electroquímico de mayores posibilidades de éxito comercial en su aplicación a las diversas necesidades relacionadas con Smart Grids, es el basado en el Aluminio/aire. El aluminio es accesible en el mercado, reciclable y, frente a otros sistemas de la misma familia, presenta una gran densidad energética (8 kWh por cada kg) y un voltaje por celda similar al conocido de baterías alcalinas, basadas en electrodos de Níquel. En las baterías de Al-Aire la placa de aluminio constituye el ánodo y el aire realiza las funciones del cátodo. La ecuación química básica está formada por cuatro átomos de aluminio, tres moléculas de oxígeno y seis moléculas de agua, que se combinan para producir cuatro moléculas de óxido de aluminio hidratado más la energía.

Figura 63 : Batería de zinc aire



Referencia: (The Agency for Science, Technology and Research, 2017).

Figura 64 : Principio de funcionamiento de una batería de litio aire



Referencia: (IBM, 2012).

Sulfuro de Sodio

Físicamente en las baterías NaS el electrodo positivo consiste en azufre (S), mientras que el material activo del electrodo negativo corresponde a sodio (Na).

Este tipo de tecnología trabaja normalmente a altas temperaturas, entre 300 °C y 350 °C con la finalidad de mantener los electrodos fundidos debido a las reacciones exotérmicas, en consecuencia, existen cambios de presión y consecuentes riesgos de explosión o incendio, pero esto no ha detenido el desarrollo de esta prometedora tecnología, si hay un cauteloso control de la temperatura, los riesgos son mínimos y las pérdidas por auto descarga son bajas.

En comparación con otras baterías, las NaS tienen una respuesta extremadamente rápida, siendo adecuadas para aplicaciones relacionadas con Calidad de Energía, Adicionalmente, estas baterías pueden inyectar hasta un 600% su potencia por pulso (Rated Power Pulse) alcanzando hasta 30 segundos de duración, lo que está limitado por las subidas de temperatura en las celdas, y la profundidad de descarga. Esto permite que esta tecnología pueda ser utilizada en aplicaciones de calidad y almacenamiento reduciendo picos rápidos en la demanda o en la producción de un parque eólico. Las baterías de NaS presentan una larga vida útil debido a que los electrodos son líquidos, eliminando la corrosión que afecta al resto de las tecnologías de electrodos sólidos.

Son insensibles a cambios de temperatura externos, facilitando su instalación en interiores o exteriores, lo que reduce su impacto respecto al lugar físico que se utiliza, los módulos son reubicables, no producen ruidos o

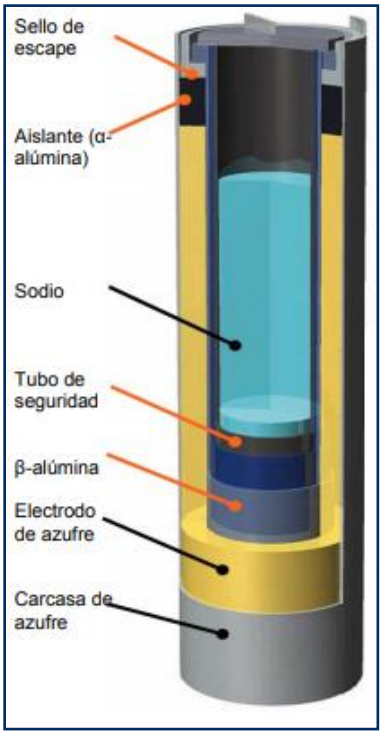
vibraciones por esto permiten su integración cercana a las cargas.

Esta tecnología no es adecuada para sistemas de respaldo (UPS), en los cuales se pueden llegar a descargar totalmente con el consecuente deterioro de los electrodos, sumado a que mantener una temperatura y voltajes adecuados es esencial en este tipo de baterías, además son necesarios sistemas de control y protección que ocupan un espacio físico adicional.

En Japón se ha demostrado la efectividad de esta tecnología en alrededor de 200 sitios, principalmente utilizada en supresión de picos de demanda; adicionalmente se ha implementado en Alemania, Francia, Estados Unidos y Emiratos Árabes Unidos.

La estructura de una celda de NaS se muestra en la Figura 65.

Figura 65: Estructura de una celda de NaS.



Referencia: (Universidad Distrital Fransisco José de Caldas, 2015)

Titanato de Litio

El Titanato de litio es una clase relativamente nueva de iones de litio. Se caracteriza por un ciclo de vida muy largo medido en miles de ciclos, junto con muy alta capacidad de velocidad de descarga y carga. Titanato de litio también es muy seguro y comparable a la de fosfato de hierro en este sentido.

La densidad de energía es más baja que otras químicas de iones de litio y la tensión nominal es 2.4V. Esta tecnología es conocida por su carga muy rápido, resistencia interna baja / alta carga y velocidad de descarga, el ciclo de vida muy alto, y una excelente resistencia / seguridad. Se ha encontrado un uso principalmente en vehículos eléctricos y de almacenamiento de energía, y los relojes de pulsera. Más recientemente, se está comenzando a encontrar uso en dispositivos médicos móviles debido a su alta seguridad. Una de las razones subyacentes de esta característica de la tecnología es que la química utiliza nanocristales en el ánodo en lugar de carbono, lo que proporciona un área de superficie mucho más eficaz.

Desafortunadamente, esta batería tiene tensiones en los terminales más bajos que otros tipos de litio. Debido a los beneficios del titanato de litio en términos de alta seguridad, alta estabilidad, larga vida útil y características ecológicas, las baterías de titanato de litio se pueden usar ampliamente en vehículos militares, aeroespaciales, eléctricos y estaciones de carga, así como sistemas de energía de respaldo críticos para el sistema. En la Figura 66 se pueden observar este tipo de baterías.

Figura 66: Batería de Titanato de Litio con encapsulado tipo botella.



Referencia: (EV Lithium, s.f.)

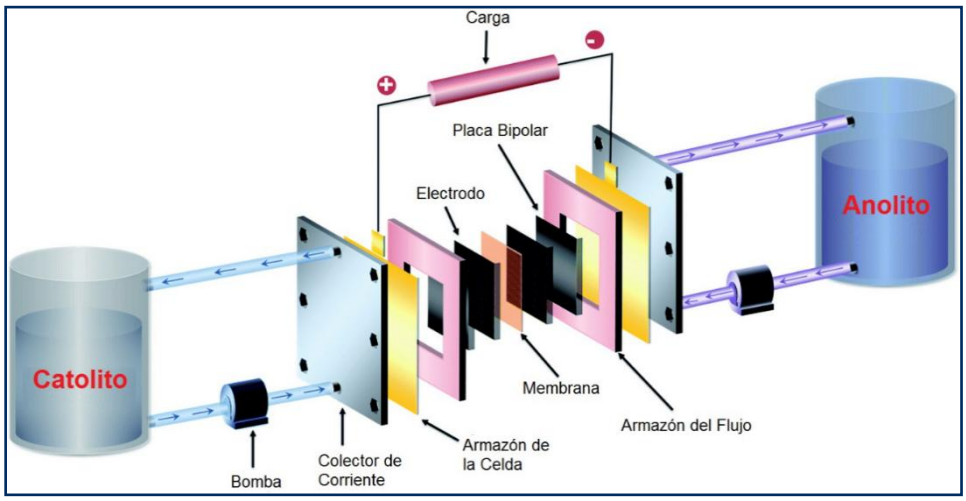
Baterías de flujo

Son baterías en las cuales la energía es almacenada en una o más sustancias disueltas en electrolito líquido. Dichos electrolitos son almacenados externamente en tanques y son bombeados a través de la celda electroquímica que convierte directamente la energía química a eléctrica y viceversa. La potencia de las baterías es definida por el tamaño y diseño de la celda electroquímica, mientras que la energía es definida por el tamaño de los tanques. Originalmente desarrolladas por la NASA en los años 1970 para vuelos espaciales de largo plazo, las baterías de flujo proveen una solución alternativa y prometedora para el almacenamiento de energía, con duraciones de horas e incluso hasta días, y con potencias del orden de los MW. A la fecha, existen dos tipos de baterías: reducción-oxidación (redox) e híbridas.

Reducción-oxidación

Como puede observarse en la Figura 67 dos disoluciones de electrolitos líquidos con iones de metal como masas activas son bombeadas a los lados opuestos de una celda electroquímica. Los electrolitos en los electrodos negativo y positivo son llamados respectivamente anolito y catolito. Durante los ciclos de carga y descarga, los iones metálicos permanecen disueltos en el electrolito como líquido; no se produce algún cambio de fase. Durante el proceso de carga, el anolito y catolito fluyen por los electrodos porosos, separados por una membrana que permite el paso de protones a través de ella para efectuar la transferencia de electrones, produciendo una corriente eléctrica. En el proceso de descarga, los electrodos son suministrados continuamente con las masas activas disueltas de los tanques; una vez convertido, el producto final es removido del tanque. Poseen un sistema de bajo impacto, que no utiliza metales pesados contaminantes y de no ser por el deterioro de la membrana de carbono, tendrían un ciclo de vida prácticamente indefinido, en el cual el electrolito permite un reciclaje completo, sin problemas de disposición de desechos. El tipo de batería de flujo más conocido es el flujo redox de vanadio. El mecanismo de almacenamiento de la batería de flujo redox de vanadio (VRFB) involucra reacciones redox en la célula que son alimentadas por materiales activos de vanadio iónico de los tanques, que resultan en electrones.

Figura 67: Componentes de una batería de flujo tipo redox.



Referencia: (Kim, y otros, 2015).

Híbridas

En este tipo de baterías, una de las masas activas es almacenada internamente dentro de la celda electroquímica, mientras que la otra masa permanece en el electrolito líquido y es almacenada externamente en un tanque. Bajo esta configuración, baterías híbridas combinan las ventajas de las baterías secundarias convencionales y las de flujo de reducción-oxidación: su capacidad depende del tamaño de la celda electroquímica. Ejemplos típicos de baterías híbridas son las de zinc-cerio y zinc-bromo: en ambos casos el anolito consiste en una solución ácida de iones de zinc (Zn^{2+}), durante la carga el zinc es depositado en el electrodo y durante la descarga, Zn^{2+} regresa a la solución. Una membrana de material poliolefina microporosa es utilizada; la gran mayoría de los electrodos son compuestos de carbono y plástico. Esta tecnología está en fase de comercialización, habiendo sistemas con capacidades de hasta 1 MW/3 MWh. La batería de flujo de zinc bromo (ZBFB) es probablemente el más conocido de los tipos de baterías de flujo híbrido. Una célula ZBFB consiste en dos compartimentos separados típicamente por una membrana microporosa. Electrodos en cada lado de la celda (uno en el lado de zinc uno en el lado del bromo) está hecho de materiales compuestos de plástico al carbono, dado que los electrodos de metal sufrirían corrosión en presencia de un ambiente rico en bromo. Dos tanques externos bombean el electrolito acuoso hacia las pilas de células durante la carga y descarga (es decir, en una configuración a la del VRFB).

Hidrógeno

El almacenamiento gracias al hidrógeno trata de, mediante la energía eléctrica o térmica procedente de centrales térmicas, nucleares, eólicas, convertir compuestos químicos para convertirlo más adelante en energía eléctrica. Este elemento se encuentra en grandes cantidades en nuestro planeta, aunque este no se encuentra en su estado puro.

El hidrógeno es un vector de energía que puede ser obtenido de varios productos, como el gas natural, el agua o el refinado de aceites pesados. Sin embargo, la única producción considerada como limpia es la que implica su obtención a base de agua y energía procedente de fuentes renovables.

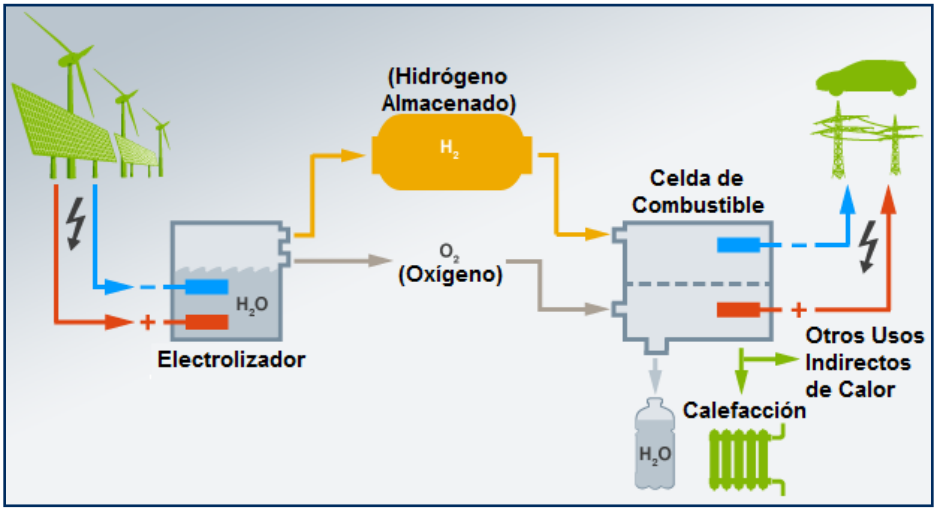
Permite tanto el almacenamiento masivo como el almacenamiento a pequeña escala, sin embargo, es más atractiva la idea de almacenamiento masivo, debido a la reducción de costes.

Como se ha dicho anteriormente, este sistema de almacenamiento (ver Figura 68) puede combinarse con cualquier fuente de energía, renovable o no, además de poder utilizarse incluso como fuente de energía en sí mismo.

La utilidad del almacenamiento de hidrógeno se basa en la producción de energía eléctrica a partir del hidrógeno; luego de su almacenamiento, se puede utilizar posteriormente como:

- Combustión de hidrógeno: Para la generación de energía eléctrica, se obtiene oxígeno de la atmósfera y se combina con el hidrógeno gracias a unas turbinas de gas, ciclos combinados o utilizado simplemente a modo de combustible (de motores, por ejemplo). Esta aplicación tiene un potencial inconveniente: la temperatura en la llama supera los 3000ºC. Como solución a este problema se puede añadir agua para controlar la temperatura alcanzada.
- Pilas de combustible de hidrógeno: se trata de la principal aplicación del hidrógeno, en el que el hidrógeno actúa como combustible en la pila, la cual genera electricidad a partir de la reacción química. Aunque la pila de combustible también funciona con combustibles fósiles, su rendimiento es mayor con hidrógeno, debido a su mayor densidad energética.

Figura 68: Ciclo operativo de un sistema de almacenamiento con hidrógeno.



Referencia: (Deutsche Welle, 2016).

Actualmente no existe ningún sistema de almacenamiento con hidrógeno de forma comercial, pero sí existen varios proyectos en fase de desarrollo que han demostrado su viabilidad exitosamente. Entre algunos casos de éxito pueden mencionarse el proyecto en la isla de Utsira en Noruega (Ver Figura 69), la central híbrida de Enertag en Alemania y Groenlandia.

Por otro lado, Futuros proyectos consideran la instalación de centros de carga de hidrógeno para vehículos como alternativa para el reemplazo de productos derivados del petróleo (Ver Figura 70).

Figura 69: Central de almacenamiento de hidrógeno en Noruega.



Referencia: (New Energy and Fuel, 2010).

Figura 70: Centro de carga para vehículos con celdas de hidrógeno.



Referencia: (International Fleet World, 2018).

Gas Natural Sintético

Otro sistema alternativo de almacenamiento químico disponible en la actualidad es la metanación, el cual es el proceso de sintetización del metano para la producción de gas natural sintético (GNS). Posterior al proceso de electrólisis y separación del hidrógeno, éste se mezcla con dióxido de carbono para producir metano en un reactor de metanación.

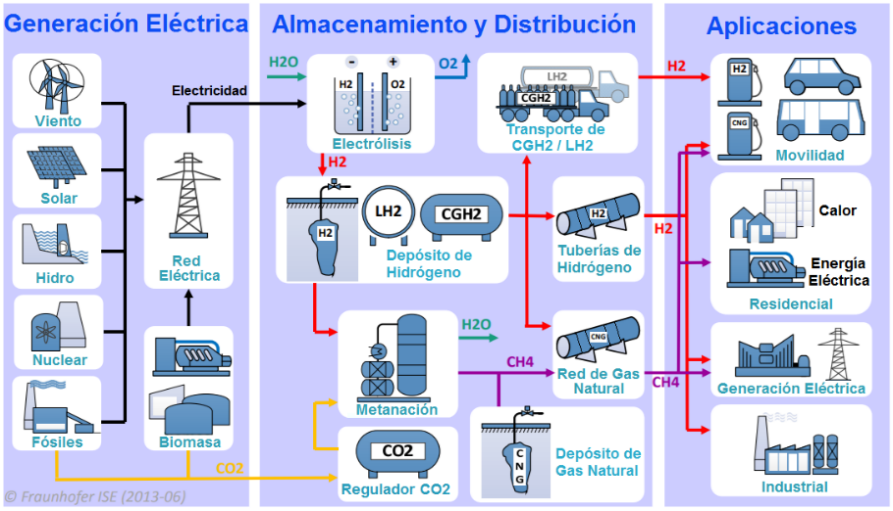
El gas natural sintético puede almacenarse en tanques a presión, contenedores, cavernas para su posterior uso, o suministrarse directamente a la red de gas.

Excelentes fuentes de dióxido de carbono para la metanación son centrales termoeléctricas, instalaciones industriales o centrales de biogás. Para reducir pérdidas energéticas, debe evitarse el transporte del CO_2 (procedente de la fuente) y H_2 (proveniente del proceso de electrólisis) hacia la central de metanación; la producción del GNS es preferible en ubicaciones donde haya excedentes de CO_2 y electricidad. Centrales de producción de biogás son excelentes lugares con excesos de CO_2, sin embargo, un almacenamiento intermedio en sitio del gas es necesario, debido a que la metanación es un proceso continuo.

En la Figura 71 se muestra el esquema del uso del hidrógeno y GNS como almacenamiento de energía química.

La principal desventaja en sistemas de almacenamiento de energía con GNS es la relativamente baja eficiencia global, debido a las pérdidas energéticas en la conversión durante la electrólisis, metanación, almacenamiento, transporte y posterior generación eléctrica. Eficiencias suelen ser inferiores al 35%.

Figura 71: Concepto global del uso de hidrógeno y gas natural sintético como portadores de energía



Referencia: (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, s.f.).

Amoniaco, Metanol y Combustibles alternativos

Para incrementar la densidad energética volumétrica y aprovechar otras infraestructuras ya existentes, el hidrógeno puede incorporarse a moléculas mayores como amoníaco o líquidos orgánicos portadores de hidrógeno. Así, el hidrógeno puede utilizarse en la síntesis de sustancias líquidas fácilmente transportables empleando las actuales redes de suministro, tales como alcoholes sintéticos, el metanol, el octano, el amoníaco o los derivados amónicos, entre otros. De entre ellos, destaca el amoníaco, al contar con una infraestructura propia desarrollada que favorecería su almacenamiento energético. Este compuesto no contiene carbono; sin embargo, posee nitrógeno y sus emisiones contribuyen a la formación de aerosoles de sulfato amónico y nitrato amónico, que deterioran la calidad del aire.

Capacitores de Doble Capa

Los condensadores electroquímicos o EDLC (Electrochemical Double Layer Capacitors) también son conocidos como supercondensadores. (Ver Figura 72). Los ultracondensadores son componentes electrónicos pasivos que permiten el almacenamiento de energía en pequeños periodos de tiempo.

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

Figura 72: Ejemplo de Supercondensadores.

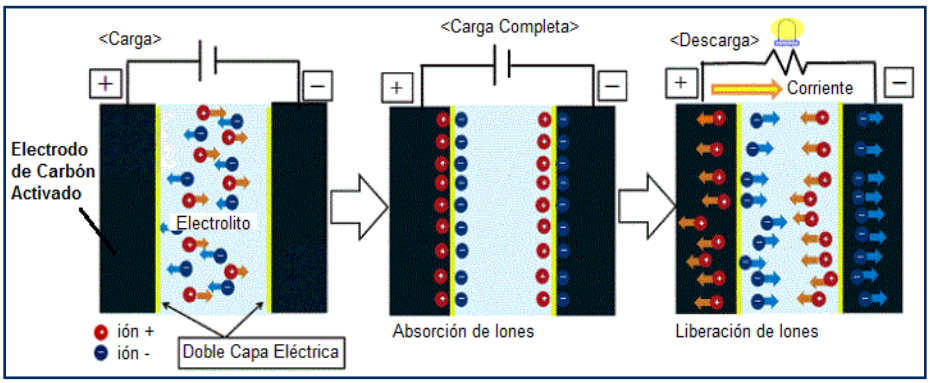


Referencia: (Energy Storage Technologies in the Electricity grid, 2017)

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

Se encuentran entre la categoría de capacitores convencionales utilizados en circuitos electrónicos y baterías de uso general, por su prácticamente ilimitado ciclo de estabilidad como por su elevada capacidad de potencia y de almacenamiento. A diferencia de los capacitores convencionales de cerámica y los electrolíticos de aluminio, estos no contienen un material dieléctrico, pero sí un electrolito sólido o líquido introducido entre dos electrodos. Esta configuración hace que se forme una doble capa eléctrica, haciendo de éste el nuevo material dieléctrico. La capacitancia del supercondensador es proporcional al área superficial de la doble capa; por consiguiente, al usar carbón activado como electrodos se logran capacitancias muy elevadas. Al aplicar un voltaje en los electrodos, los iones se desplazan hacia las paredes de la doble capa eléctrica, resultando en el proceso de carga del supercondensador; cuando se descarga, se produce el proceso opuesto, tal como aparece en la Figura 73.

Figura 73: Ciclo de carga y descarga de un supercapacitor.



Referencia: (Murata, s.f.).

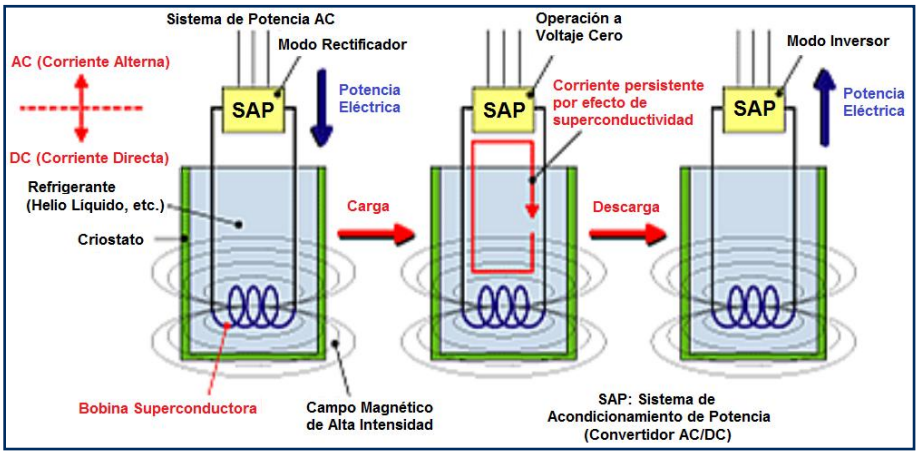
En sistemas fotovoltaicos se utilizan ultracondensadores dispuestos en paralelo para estabilizar la tensión de salida de las células, permitiendo además disminuir picos de tensión. Los ultracondensadores no solo tienen una mayor vida útil que las baterías para el almacenamiento solar, sino que además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

No obstante, el uso de supercapacitores no son recomendables para el almacenamiento de energía por periodos extendidos de tiempo porque estos dispositivos tienen una tasa de auto descarga alta, otro motivo por el cual en la mayoría de las ocasiones se descartan como opción válida es su densidad de energía, muy baja comparado con las baterías, lo que para el mismo espacio de almacenamiento tendríamos una cantidad mucho menor de energía almacenada, además de su mayor coste.

Los superconductores son capaces de transportar altos niveles de corrientes en la presencia de altos niveles de campos magnéticos a bajas temperaturas con cero resistencias al flujo de corriente eléctrica, a menos que sus valores críticos: temperatura (Tc), densidad de flujo magnético (Bc) y densidad de corriente (Ic), sean excedidos. La energía es almacenada en el campo magnético creado por el flujo de corriente directa en una bobina superconductora, el cual se mantiene a una temperatura inferior a su temperatura crítica superconductora. El componente principal de esta tecnología es la bobina compuesta de un material superconductor; componentes complementarios incluyen el sistema de refrigeración criogénica y el equipo de acondicionamiento de potencia.

La superconductividad fue descubierta en 1911 por Heike Kamerlingh Onnes, quien se encontraba estudiando la resistencia del mercurio sólido a temperaturas criogénicas, utilizando helio líquido como refrigerante. Una temperatura de 4 K era requerida; debido a estudios e investigaciones científicas, en la actualidad se han diseñado materiales con capacidad de funcionar a temperaturas críticas más altas, alrededor de los 100 K. En la Figura 74 se muestra el método de almacenamiento de energía mediante esta tecnología. La principal ventaja de este sistema es su virtualmente instantáneo tiempo de respuesta ante el suministro de energía. Adicionalmente, se caracteriza por ser altamente eficiente (85% - 90%), brindar grandes cantidades de energía en un reducido periodo de tiempo, y no disponer de partes móviles en su sistema principal. Teóricamente, la energía puede almacenarse indefinidamente, siempre y cuando el sistema de refrigeración se encuentre en funcionamiento, aunque tiempos extendidos de almacenamiento son limitados significativamente por la demanda energética del sistema de refrigeración.

Figura 74: Almacenamiento de energía aprovechando el fenómeno de superconductividad



Referencia: (Nomura, 2015).

Se caracterizan por almacenar la energía en forma de calor disponible en depósitos aislados térmicamente para luego emplearla en aplicaciones residenciales o industriales tales como calefacción o enfriamiento, producción de agua caliente o generación de energía eléctrica.

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

Almacenamiento de Calor Sensible

Es una de las tecnologías más conocidas y con múltiples aplicaciones implementadas comercialmente, tal como es el uso de un tanque para un sistema de agua caliente doméstico.

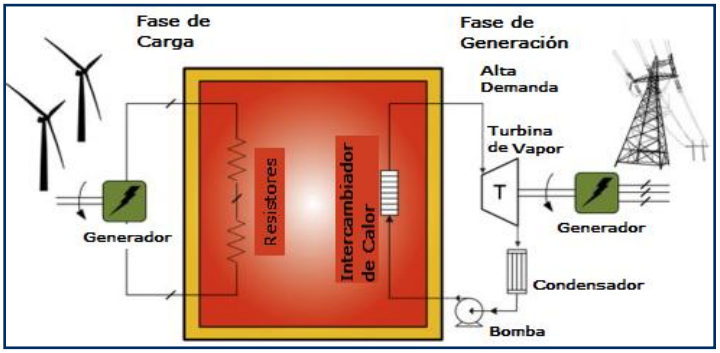
El almacenamiento de calor sensible se lleva a cabo mediante transferencia de calor a un elemento que lo almacena sin cambiar de estado. Los materiales usados para almacenar energía sensible se mantienen sin cambio de fase en el rango de temperaturas del proceso de almacenamiento y el calor almacenado.

Además de la densidad y del calor específico, existen otras propiedades que influyen en el almacenamiento de calor sensible, como son la temperatura de operación, la conductividad térmica, difusión, presión de vapor y por último es muy importante tener en cuenta los costes. Una gran variedad de fluidos ha sido probada como materiales de almacenamiento, agua, aceites y sodio; destacando entre ellos, las sales fundidas. El esquema de este sistema de almacenamiento se muestra en la Figura 75.

Su elección atiende a que son líquidas a presión atmosférica, presentan una excelente relación entre la capacidad de almacenamiento y el precio, sus temperaturas de operación son compatibles con las altas presiones y temperaturas en las turbinas de vapor, y no son inflamables ni tóxicas (a diferencia de los aceites sintéticos).

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

Figura 75: Esquema de Sistema de Almacenamiento de Calor Sensible.



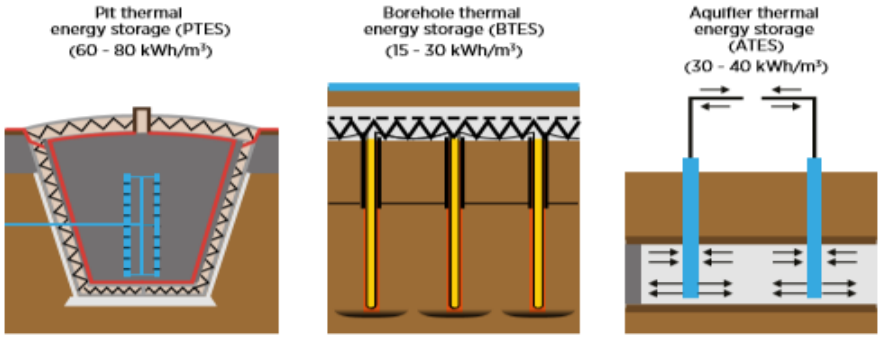
Referencia: (Energy Storage Toolbox, 2018)

Para este tipo de almacenamiento, las tecnologías que se encuentran desarrolladas son las siguientes:

- Almacenamiento de energía térmica de tanque (TTES)
- Almacenamiento de estado sólido
- Almacenamiento por sales fundidas
- Almacenamiento de energía térmica bajo tierra (UTES)

El TTES utiliza un fluido, comúnmente agua, como medio para el almacenamiento, es la forma más simple, generalizada y técnicamente madura de almacenamiento térmico, en términos de volumen estos tanques van desde unos cientos de litros hasta los 80,000.00 m^3, limitado por el espacio y la construcción del tanque. Usualmente proveen almacenamiento diario, y son cargados por tecnología térmica solar calentando agua a 80-90°C. El almacenamiento de estado sólido implica el uso de material particulado para almacenar calor y un fluido que circula a través del lecho para transferir calor dentro y fuera del sistema. Estos sistemas varían en tamaño y se pueden utilizar una gama de materiales, como bloques de cerámica, lechos de cemento, entre otros. Esta tecnología es simple, relativamente barata y escalable, se usan en instalaciones que requieren un grado bajo de calor. El almacenamiento por sales fundidas es utilizado en almacenamiento de alto grado de calor altamente controlados, como el sistema de potencia, es específicamente utilizado en las plantas de concentración solar, donde el calor es almacenado durante el día y se descarga durante la noche accionando una turbina manteniendo una producción eléctrica continua. El sistema UTES tiene distintos medios de almacenamiento, pueden ser estratos geológicos, formados por tierra, arena o roca sólida, o agua en fosas artificiales, o acuíferos. Las tecnologías UTES clave son el almacenamiento de energía térmica de acuíferos (ATES), el almacenamiento de energía térmica de pozos (BTES) y el almacenamiento de energía térmica en boxes (PTES), como se observa en la Figura 76. Estos sistemas tienen la ventaja clave de que grandes cantidades de energía térmica se pueden almacenar a lo largo de las estaciones; sin embargo, la eficiencia de estos sistemas es relativamente baja y, por lo tanto, se despliegan mejor junto con una fuente barata de energía térmica.

Figura 76: Principio de funcionamiento de materiales de cambio de fase.



Referencia: (IRENA, 2020)

Almacenamiento de Calor Latente

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

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

La energía térmica en forma de calor latente puede almacenarse al utilizar como medio de almacenamiento materiales que cambian de fase, los cuales pueden ser orgánicos (parafinas) o inorgánicos (hidratos de sales). El material más común empleado para el almacenamiento de calor latente son los materiales de cambio de fase sólido líquido (PCM).

En cualquier caso, son capaces de almacenar grandes cantidades de calor durante el cambio de fase de líquido a sólido. Los materiales PCM pueden almacenar entre 5 y 14 veces más energía en el mismo volumen en comparación con otros materiales como el agua o la roca.

Sin embargo, la mayoría de estos materiales presentan el gran inconveniente de un bajo coeficiente de conductividad del calor, por lo que se deben emplear métodos de mejora de la transmisión energética para así aumentar el rendimiento y utilidad del sistema de almacenamiento.

La gran ventaja que tienen estos sistemas en comparación con los sistemas de calor sensible es su gran capacidad de almacenamiento de energía en un volumen reducido de medio y a una diferencia de temperatura reducida, traduciéndose en una transferencia de calor más efectiva y eficiente.

Para este tipo de almacenamiento se diferencian cuatro tipos de tecnología, las cuales son:

- Sub-cero (cambio de fase debajo de 0°C)
- Hielo (cambio de fase del agua a 0°C)
- Baja temperatura (cambio de fase del agua de 0°C a 120°C)
- Alta temperatura (cambio de fase del agua de por encima de 120°C)

Absorción y Adsorción Electroquímica

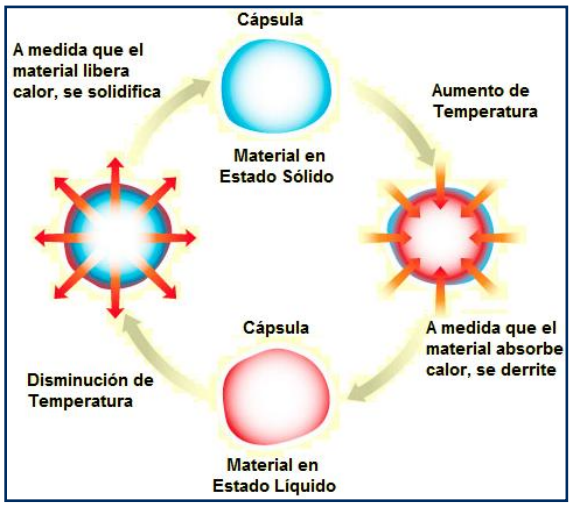
Sistemas de este tipo fungen como bombas de calor termoquímicas bajo condiciones de vacío; por consiguiente, tienen un diseño mucho más complejo y tienen un costo muy elevado.

Durante el proceso de almacenamiento, calor proveniente de una fuente a alta temperatura es transferido a un adsorbente (gel de sílice o zeolita), y vapor de un fluido de trabajo como el agua es desorbido y condensado a bajas temperaturas en un condensador, removiendo así el calor de condensación del sistema. Posteriormente, el adsorbente seco y el fluido de trabajo separado puede almacenarse por el tiempo deseado.

En el proceso de descarga, el fluido de trabajo recibe calor a bajas temperaturas dentro de un evaporador; seguidamente, el vapor del fluido de trabajo adsorbe en el adsorbente y calor de adsorción es liberado a altas temperaturas. El funcionamiento puede observarse gráficamente en la Figura 77.

Dependiendo de la combinación de adsorbente y fluido de trabajo, la temperatura del calor liberado puede llegar hasta 200°C y la densidad de energía puede llegar a ser hasta tres veces más alta que la del calor sensible almacenable en el agua.

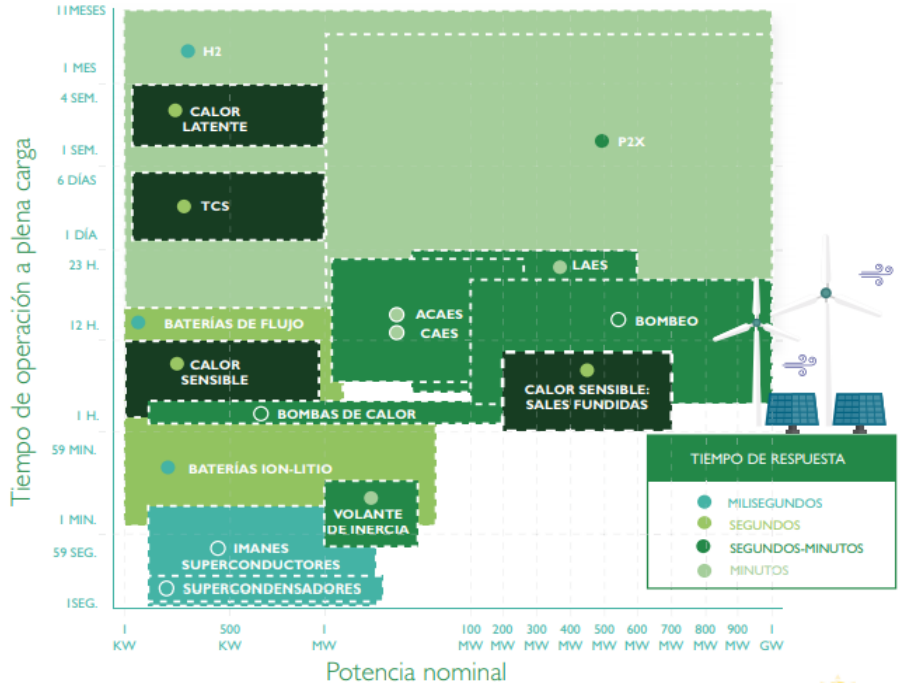
Figura 77: Principio de funcionamiento de materiales de cambio de fase.



Referencia: (University of Southern California, 2010).

En la Tabla 1, Tabla 2, Tabla 3 y en la Figura 78 se presenta un resumen comparativo de las tecnologías de almacenamiento de energía. En la Tabla 4 se observa las aplicaciones respectivas de las tecnologías de almacenamiento.

Figura 78: Comparación de tecnologías de almacenamiento de energía: potencia nominal, energía y tiempo de descarga



	TECNOLOGÍA	CAPACIDAD ENERGÉTICA	EFICIENCIA DE CICLO COMPLETO	NIVEL DE MADUREZ
MECÁNICA	Bombeo (PHS)	1-100 GWh	80%	
	Bombas de calor (PHES)	500 kWh - 1GWh	70 - 75%	
	Aire comprimido adiábatico (ACAES)	10 MWh - 10 GWh	> 70%	
	Aire comprimido (CAES)	10 MWh - 10 GWh	45 - 60%	
	Aire líquido (LAES)	10 MWh - 8 GWh	50 - 100%	
	Volante de incercia	5 - 10 kWh	85%	
ELECTROQUÍMICA	Baterías ión-litio	<10 MWh	86%	
	Baterías de flujo (V, Zn,Fe, Zn Br)	<100 MWh	70%	
ELÉCTRICA	Imanes superconductores (SMES)	1 - 10 kWh	>90%	
	Supercondensadores	1 - 5 kWh	90%	
QUÍMICA	Power to gas (H2)	Hasta 100 GWh	20- 40%	
	Power to X (P2X)	1 MWh - varios GWh	50%	
TÉRMICA	Calor sensible: Sales fundidas	100 MWh - 10GWh	40 - 60%	
	Calor sensible	10 - 50 kWht	50 - 90%	
	Calor latente (PCM)	50 - 150 kWht	75 - 90%	
	Termoquímico (TCS)	12 - 250 kWht	75 - 100%	

MUY MADURO — NO MADURO

Referencia: (MITECO, 2021)

Tabla 1: Comparación de Sistemas de Baterías por su Potencia y Energía Almacenada.

Tipo de batería	Rango de potencia	Potencia específica (W/kg)	Energía específica (Wh/kg)	Densidad de energía (Wh/L)
Pb-ácido	Alta (decenas de MW)	Media	Muy baja	Baja
Ni-Cd	Alta (decenas de MW)	Media	Baja	Media-baja
NiMH	Baja	Media	Media	Media-alta
Zebra	Baja (decenas de KW)	Baja	Alta	Alta
Sodio-sulfuro	Alta (decenas de MW)	Baja	Media	Media
Metal-aire	Media (MW)	Media	Alta	Alta
Titanato de bario	N/A	N/A	N/A	N/A
Ión-Litio	Baja (decenas de KW)	Alta	Alta	Alta
Litio-Fosfato de Hierro	Baja	Alta	Media-alta	Alta
Li-Po	Baja	Alta	Alta	Alta

Referencia: (Universidad de Valladolid, 2016)

Tabla 2: Comparación de Tecnologías de Almacenamiento.

Tipo de Almacenamiento	Voltaje Nominal (V)	Tiempo de Respuesta	Energía Especifica (Wh/Kg)	Densidad Energetica (Wh/L)	Vida Util (Años)	Ciclos de Vida	Temperatura de Trabajo (°C)	Tiempo Típico de Carga	Tiempo Típico de Descarga	Porcentaje de Perdidas por día	Eficiencia Energetica (%)	Costo por kWh (USD/kWh) [1]
Hidroelectricas con Central de Bombeo	–	Minutos	0.2 - 2	0.2 - 2	> 30	> 15000	–	–	Horas	0 - 0.5	70 - 80	20 - 105
Aire Comprimido	–	Minutos	–	2 - 6	> 30	> 10000	–	–	Horas	0 - 10	41 - 75	44 - 53
Volantes de Inercia	–	< segundos	5 - 30	20 -80	15 - 20	2x10^7	–	–	Segundos	–	80 - 90	1500 - 6000
Hidrogeno Centralizado	–	Segundos	33330	600 (200 bar)	10 - 30	10^3 - 10^4	–	–	Horas - Semanas	0 - 1	24 - 45	10
Gas Natural Sintetico	–	Minutos	10000	1800 (200 bar)	10 - 30	10^3 - 10^4	–	–	Horas - Semanas	–	30 - 38	
Capacitores de Doble Capa	2.3 - 2.75	< Segundos	1 - 15	3.6	4 - 20	10^6	-40 - 65	Segundos	< Segundos	–	80 - 98	7200
Bobinas Magnéticas Superconductoras	–	< Segundos	1 - 10	6	Ilimitados	Ilimitados	-224	Segundos	Segundos	0 @ 4 Kelvin	75 - 95	300 - 1000

Referencia: Los datos para cada tecnología fueron obtenidos de International Renewable Energy Agency (IRENA), U.S Energy Information Administration (EIA) y otras fuentes.

Definiciones

- **Tiempo de Respuesta**: Tiempo que le toma al sistema el reaccionar a una entrada especifica.
- **Energía especifica**: Medida de la densidad de energía almacenada en vatios-hora / kilogramo.
- **Densidad Energética**: Medida de la densidad de energía almacenada en vatios-hora / Litro.
- **Vida Útil**: Número de años que el sistema de almacenamiento puede realizar satisfactoriamente antes
- necesidad de ser reemplazado.
- **Ciclos de Vida**: Número total de ciclos de carga y descarga que el sistema de almacenamiento puede
- Administrar en su vida.
- **Temperatura de Trabajo:** Temperatura necesaria para un funcionamiento óptimo.
- **Tiempo Típico de Carga**: Tiempo que le toma a la batería alcanzar su valor nominal.
- **Tiempo Típico de Descarga**: Tiempo que le toma a la batería alcanzar el 10% de su valor nominal.
- **Porcentaje de Perdidas por día**: Valor porcentual de las pérdidas en base al total del sistema diario.
- **Eficiencia**: Relación de "salida de potencia útil" sobre "entrada de potencia total".
- **Costo por kWh**: costo de almacenamiento por kWh de cada tecnología.

Tabla 3: Comparación de Baterías por Tecnología

Tipo de Almacenamiento	Voltaje Nominal (V)	Tiempo de Respuesta	Energía Especifica (Wh/Kg)	Densidad Energetica (Wh/L)	Vida Util (Años)	Ciclos de Vida	Temperatura de Trabajo (°C)	Tiempo Típico de Carga	Tiempo Típico de Descarga	Porcentaje de Perdidas por día	Eficiencia Energetica (%)	Costo por kWh (USD/kWh) [1]
Plomo - Acido	2.1	< segundos	35 - 40	80 - 90	10	250 - 1500	–	Horas	Minutos	0.3	85	147 - 263
Plomo - Acido (GEL)	2 - 6	< segundos	42	30 - 80	12	100 - 2000	–	Horas	Horas	0.3	81	150 - 369
Litio (NMC)	3.6 - 3-7	< segundos	175	345	14	1000 - 2000	–	Horas	Horas	0.1	92.5	480 - 775
Litio (LFP)	3.2	< segundos	120	220	10	1000 - 2000	–	Horas	Horas	0.1	86.5	600 - 1020
Titanato de Litio	2.4	< segundos	110	177	17	6000 - 20000	–	Horas	Horas	0.1	96.5	473 - 1260
Litio (NCA)	3.8	< segundos	215	120	14	± 500	–	Horas	Horas	0.2	92.5	450 - 729
Bateria de Sal Fundida (ZEBRA)	2.58	Minutos	90	160	20 - 30	± 7000	400 - 700	–	Horas	1 - 8	90 - 99	219
Sulfuro de Sodio (NaS)	2	< segundos	206	150 - 300	16	± 5500	300	Horas	> Horas	7	85	386 - 735
Redox de Vanadio	1.15 - 1.55	segundos	45	15 - 25	10 - 20	> 10000	–	Horas	> Horas	0.2	75 - 80	150 - 1000
Redox (ZnBr)	1.8	segundos	50	39	12	> 2000	–	Horas	> Horas	15	75.9	525 - 1000
Niquel - Cadmio	1.2	< segundos	40 - 70	50 - 120	15	1500 - 3000	–	Horas	Minutos	0.32	70 - 90	400 - 1200
Niquel - Metal Hidruro	1.2	< segundos	70 - 120	140 - 300	8	500 - 2000	–	Horas	> Horas	0.5	75	800 - 3500

Referencia: Los datos para cada tecnología fueron obtenidos de International Renewable Energy Agency (IRENA), U.S Energy Information Administration (EIA) y otras fuentes

Tabla 4: Aplicaciones de los Almacenamientos de Energía

Tipo de Tecnología	Balance Energetico	Calidad de Energia	Generación Eléctrica	Servicios Auxiliares	Generación Eléctrica en Horas punta	Alto consumo de Corriente	Almacenamiento	Transporte	Integración con Renovables
Hidroelectricas con Central de Bombeo	√	√			√		√		
Volantes de Inercia	√	√					√	√	
Aire Comprimido	√				√		√		√
Hidrogeno Centralizado	√	√	√		√				
Gas Natural Sintetico			√		√				
Capacitores de Doble Capa	√	√							
Bobinas Magnéticas Superconductoras	√	√							
Plomo - Acido	√	√		√				√	
Plomo - Acido (GEL)	√	√		√			√	√	
Litio (NMC)				√			√	√	
Litio (LFP)				√		√	√		
Titanato de Litio				√			√		
Litio (NCA)				√			√	√	
Bateria de Sal Fundida (ZEBRA)			√		√		√		
Sulfuro de Sodio (NaS)	√	√	√	√	√		√		√
Redox de Vanadio	√			√			√		
Redox (ZnBr)	√			√			√		
Niquel - Cadmio	√							√	
Niquel - Metal Hidruro	√							√	

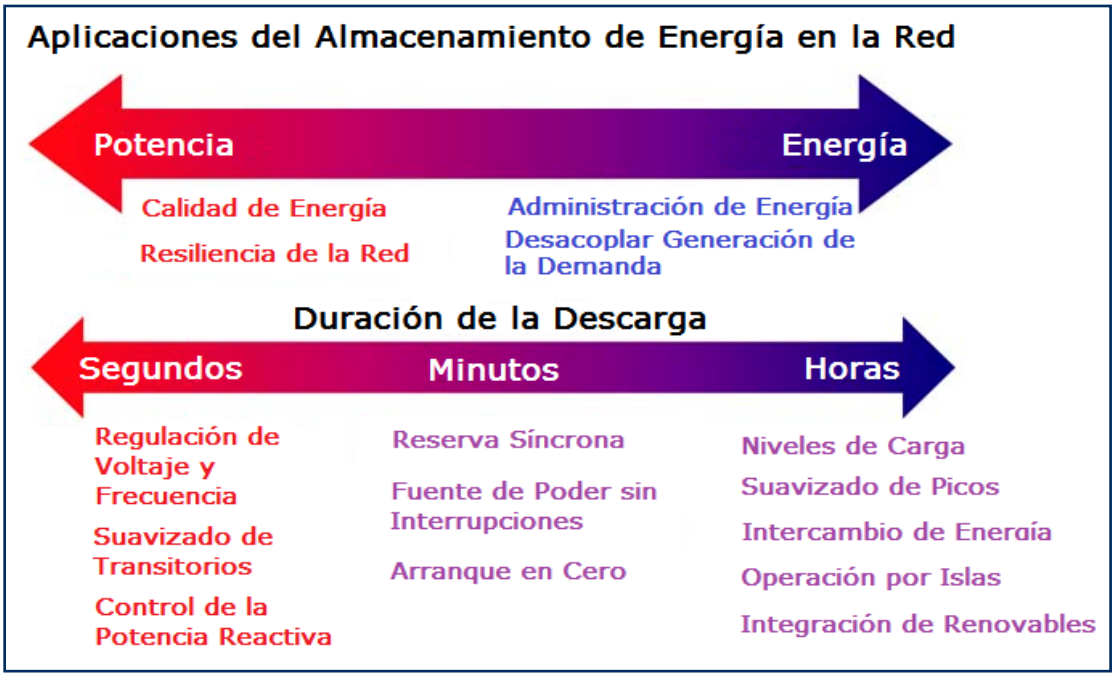
Referencia: (ETESA, 2019)

En años anteriores, la energía eléctrica no podía almacenarse económicamente en grandes cantidades y tenía que producirse en el instante en que se necesitaba y se consumía tan rápido como era su producción.

Las tecnologías modernas de almacenamiento de energía han cambiado todo eso, allanando el camino para la adopción de fuentes de energía renovables, la oferta de nuevos servicios al cliente y una red más segura y rentable.

Con el avance de la electrónica de potencia y la reducción de costos en los materiales de construcción de los sistemas de almacenamiento, se hace viable su aplicación en los sistemas eléctricos de potencia como se muestra en la Figura 79.

Figura 79: Tiempo de descarga según aplicación en la Red Eléctrica.



Referencia: (Grid Scale Energy Storage Systems, s.f.)

Integración de Renovables:

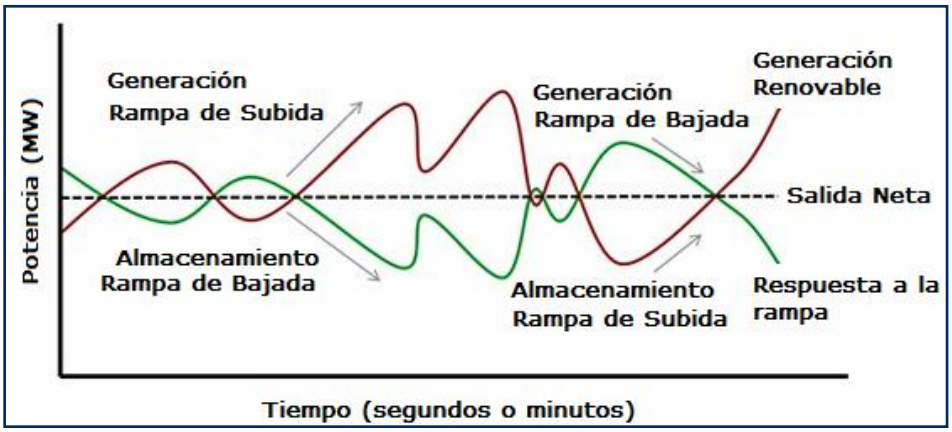
Aparte de la variabilidad del suministro, el problema con estas fuentes de energía intermitentes es que la energía puede estar disponible cuando no se necesita y puede no estar disponible cuando se necesita. Aunque no hay Sol durante la noche, al menos sabemos que el Sol sale todos los días y la variación de la intensidad de radiación recibida tiende a coincidir aproximadamente con el perfil de demanda de electricidad. El viento sin embargo es menos predecible.

Sin embargo, el almacenamiento de energía es especialmente adecuado con estas tecnologías para amortiguar y suavizar la variabilidad de estos sistemas y se está utilizando ampliamente para este propósito.

Seguimiento de las Rampas de Generación:

Es el cambio de generación de potencia de salida a lo largo de marcos de tiempo que van desde unos pocos segundos a unos pocos minutos. Similar al seguimiento de la demanda, el servicio auxiliar de respuesta a rampa de generación implica recursos que compensan la rampa de salida. Por lo tanto, los recursos utilizados para el servicio de rampa proporcionan una variabilidad de salida que es la inversa de la variabilidad de salida de otras generaciones debido a la rampa. Un ejemplo de esto lo vemos en la Figura 80.

Figura 80: Generación de Energía Renovable y Almacenamiento en Rampa



Referencia: (E&I Consulting, s.f.)

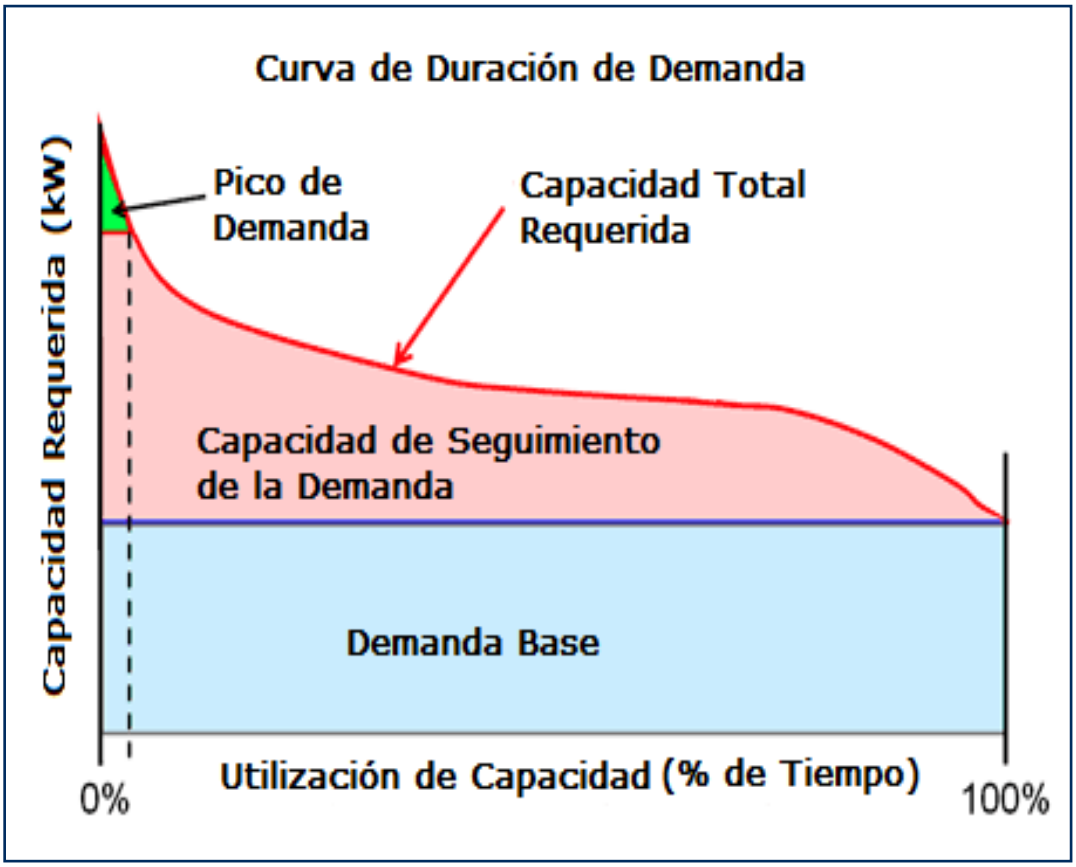
Seguimiento de la Demanda

El seguimiento de carga se requiere durante las llamadas "horas de carga" en el ciclo de demanda eléctrica diaria:

- Mientras que la demanda eléctrica aumenta en la mañana a medida que las personas comienzan su día y se preparan para el trabajo y la escuela y otras actividades diarias normales.
- A medida que la demanda eléctrica disminuye por la noche, el trabajo y las actividades domésticas disminuyen.

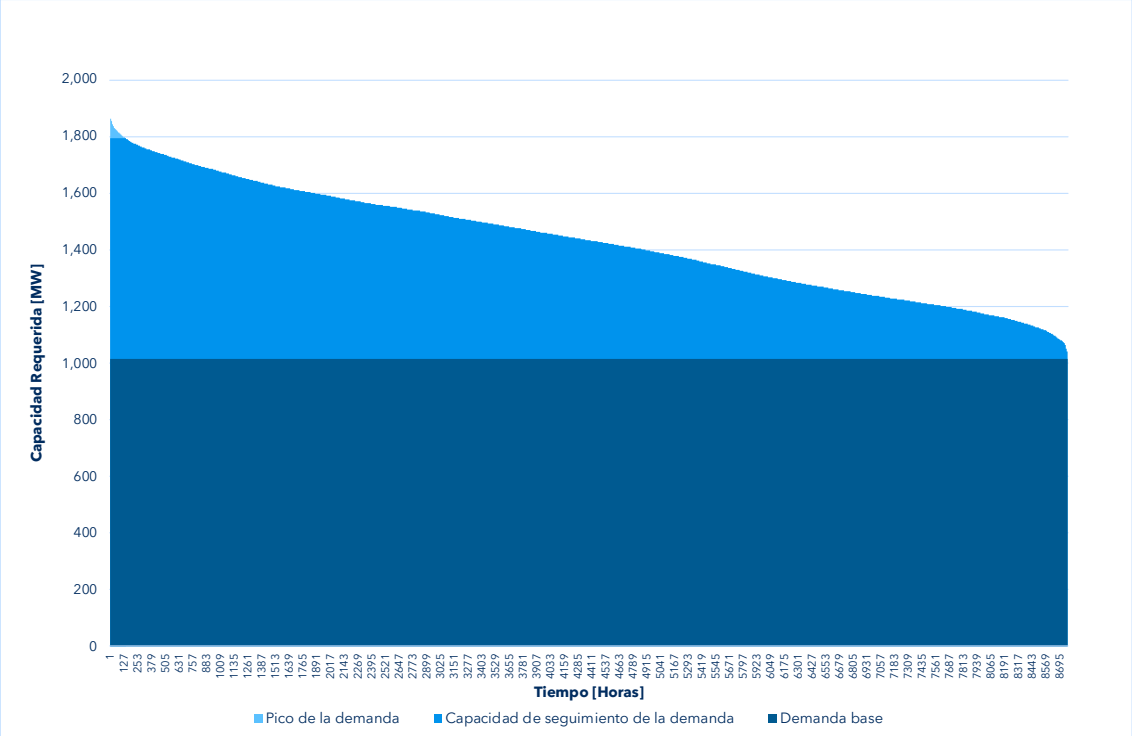
En la Figura 81 se observa el modelo de la curva de duración de la demanda y en la Figura 82 la curva de duración de la demanda horaria del año 2024, en Panamá.

Figura 81: Curva de Duración de la Demanda



Referencia: (Grid Scale Energy Storage Systems, s.f.)

Figura 82: Curva de duración de la demanda eléctrica de Panamá 2024



Referencia: (ETESA, 2025)

TRANSMISIÓN Y DISTRIBUCIÓN

Calidad de Energía

La calidad de energía describe la capacidad de la red eléctrica para suministrar un flujo de energía limpio y estable que actúa como una fuente de alimentación que siempre está disponible, tiene una forma de onda sinusoidal sin ruido y está siempre dentro de las tolerancias de voltaje y frecuencia.

Los principales factores que contribuyen a la inestabilidad del voltaje y la interferencia en, o la distorsión de la forma de onda del voltaje, son el flujo de potencia reactiva y la presencia de transitorios y armónicos en la red como resultado de las cargas reactivas y los circuitos de conmutación de alta potencia conectados a ella.

La mayoría de las cargas conectadas al sistema de distribución de la red, como motores, transformadores y cables, son de naturaleza inductiva y hacen que fluya en el circuito un componente reactivo de la corriente que los alimenta, así como un flujo de corriente resistiva que alimenta el dispositivo.

La energía para suministrar esta corriente reactiva (ya sea para cargas inductivas o capacitivas) tiene que ser suministrada por el generador, que debe desviar parte de su energía

disponible para satisfacer esta demanda.

La consecuencia es que la tensión que crea la corriente resistiva disminuye, lo que reduce la tensión en la red y, por lo tanto, la potencia disponible para la carga. Esto significa que el voltaje en cualquier punto de la red será menor que el voltaje disponible para una carga resistiva pura y dependerá de la magnitud de la potencia reactiva transportada por la línea de transmisión.

El método aplicado para este inconveniente es la corrección del factor de potencia, que busca contrarrestar los flujos de potencia reactiva con pérdida introduciendo componentes reactivos compensadores para equilibrar las reactancias positivas y negativas para devolver el factor de potencia a la unidad y así reducir la corriente del generador.

La mayoría de las cargas en la red son inductivas y la compensación pasiva del factor de potencia se puede proporcionar en la subestación conectando los capacitores en paralelo con la carga.

Sin embargo, las cargas en la red suelen ser variables, ya que son el agregado de las cargas de numerosos consumidores, mientras que la capacidad de los bancos de condensadores solo está disponible en incrementos fijos, de modo que la compensación solo es efectiva en un rango de reactancia estrecho. Los consumidores industriales pueden proporcionar esta compensación en sus propias instalaciones.

De manera similar, los reguladores de voltaje y los transformadores de potencia con cambiadores de tomas en carga (OLTC) se instalan en subestaciones para proporcionar control de voltaje.

Aplazamiento de Actualización de los Sistemas

El almacenamiento de energía puede retrasar la sustitución tanto de antiguos equipos como de sistemas de la red eléctrica, gestionando así un ahorro de dinero para los propietarios de infraestructuras de transmisión. Por ejemplo; cuando un transformador se reemplaza por un transformador nuevo, más grande, su tamaño se selecciona para manejar incremento de la demanda eléctrica en los próximos 15 a 20 años. Esto conduce a la subutilización de transformadores para la mayoría de sus vidas. Sistemas de almacenamiento de energía puede descongestionar los transformadores existentes durante las horas pico, evitando así la necesidad de equipos de mayor potencia.

Extensión de la vida útil de los equipos de Transmisión y distribución

Al igual que con los aplazamientos de la actualización de Transmisión y Distribución, se pueden utilizar pequeñas cantidades de almacenamiento para prolongar la vida útil del equipo T&D si el uso del almacenamiento reduce la carga y, por lo tanto, el calentamiento y desgaste excesivos del equipo existente que se acerca a su vida útil prevista. El resultado es una extensión de la vida útil de los equipos existentes. Quizás el ejemplo más convincente en nuestro caso sea las líneas de transmisión. La prolongación de la vida útil se logra reduciendo la carga máxima de estas líneas que, a su vez:

- Evita la sobrecarga excesiva de las líneas.
- Reduce el número o la posibilidad de fallas a tierra que tienen un efecto dramático en la vida útil del cable.

Suavizado de Picos de Demanda

Sin almacenamiento de energía, las cargas pico de corta duración normalmente son suministradas por generadores de acción rápida como las turbinas de gas. Estos son activos costosos, generalmente con menor eficiencia térmica que los generadores de carga base, y pueden tener un factor de carga de solo 2% o menos debido al tiempo limitado que se requieren.

El suavizado de picos se refiere al recorte de la demanda de capacidad de generación inmediata durante los cortos períodos de demanda máxima y al suministro de cargas en lugar de fuentes de energía almacenadas. Por lo tanto, la capacidad de generación o transmisión máxima se puede reducir por el potencial total de todo el almacenamiento más las cargas diferibles, lo que ahorra el gasto de esta capacidad.

COMERCIAL, INDUSTRIAL Y RESIDENCIAL

Transferencia de Energía en función de la hora

La transferencia de energía eléctrica en función de la hora implica el almacenamiento de energía eléctrica cuando el uso y el valor de la energía son bajos, de modo que la energía se puede usar o vender, más adelante, cuando el uso y el valor de la energía son altos.

El objetivo es utilizar energía de bajo precio en momentos en que el costo para producir la energía o el precio para comprar la energía son altos (es decir, durante los períodos de "demanda máxima"). El precio para comprar esa energía en tiempo real (cuando sea necesario) es alto porque la demanda de electricidad es alta. El costo de producción de energía en ese momento también es alto, principalmente porque se utiliza la generación con menor consumo de combustible.

Funcionamiento como islas

Pueden requerirse medidas especiales para garantizar suministros a clientes remotos. Algunas comunidades isleñas o sitios industriales sin capacidad de generación local pueden estar conectadas a la red a través de un único enlace vulnerable. En tales casos, la energía de emergencia puede ser proporcionada por baterías grandes capaces de mantener el suministro por un día o más.

SERVICIOS AUXILIARES

Regulación y Respuesta de Frecuencia

La regulación de frecuencia es el medio por el cual se mantiene la frecuencia de sincronización de los generadores de una red eléctrica dentro de límites aceptables, típicamente 50 o 60 Hz. Esto se realiza mediante ajustes continuos a la potencia de salida para lograr un valor estable de la frecuencia, sin embargo, cuando el consumo de energía eléctrica excede momentáneamente la energía que se está generando en ese momento, ya sea, por un mayor uso por parte del cliente o una capacidad de generación reducida en algún lugar de la red, el aumento de carga en los generadores en operación resultará en una disminución de su velocidad de rotación y, dado que los generadores son máquinas sincrónicas, la frecuencia de la corriente alterna de la red también disminuirá.

Del mismo modo, si el consumo cae repentinamente por debajo de la potencia generada o si se cambia la capacidad de generación a la red, el generador se acelerará y la frecuencia de la red aumentará. La razón principal para un control de frecuencia preciso es sincronizar la velocidad de rotación de los muchos generadores conectados a la red.

El desajuste de frecuencia entre los generadores en la red puede tener serias consecuencias. Cuando dos generadores síncronos se conectan en paralelo y suministran a la misma carga, solo hay una corriente a través de la carga, de modo que la velocidad de rotación y la salida de frecuencia de ambos generadores serán iguales y están bloqueadas a la frecuencia de la corriente a través de la carga.

Los pares de torque del generador pueden ser diferentes, pero son máquinas síncronas y, como tales, se sincronizarán entre sí. Si el motor primario de una máquina no produce suficiente energía para mantener el rotor de su generador girando a la velocidad síncrona deseada, la energía fluirá desde el otro motor primario para que ambos giren a una nueva velocidad síncrona. Esto se conoce como "motorización" del generador.

El generador "motorizado" más lento se convierte en una carga para el sistema y, de hecho, comenzará a impulsar su propio motor primario que, en consecuencia, estará sujeto a fuerzas involuntarias. Además, esto puede dar lugar a corrientes excesivas en la red. Esta no es una condición normal y puede dañar el generador o su motor

principal, así como la inestabilidad en la red.

Para evitar la posibilidad de dañar los escenarios de desequilibrio de energía que afectan adversamente a la red, el operador de la red debe mantener una capacidad de generación de reserva para cubrir los desequilibrios con diferentes magnitudes y duraciones para mantener la capacidad de generación lo más cerca posible en línea con la demanda en todo momento.

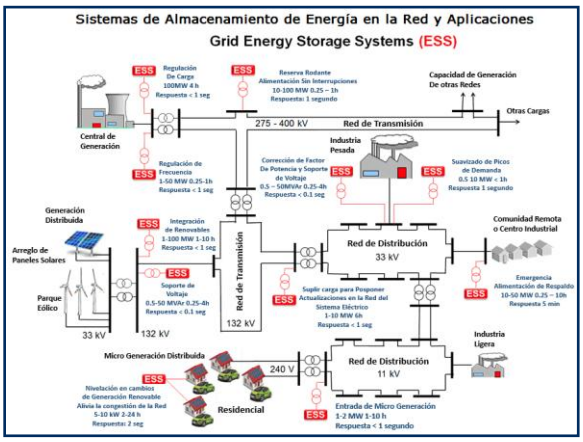
La gestión de este requisito requiere una capacidad de reserva de acción rápida que se puede conectar a la red para proporcionar un balanceo inmediato a corto plazo y, posiblemente, una respuesta más lenta, generando capacidad para cubrir los desajustes de capacidad de mayor duración. La regulación de frecuencia implica la conciliación momento a momento de la demanda de electricidad y el suministro. La conciliación se realiza cada pocos segundos y la duración de la intervención o el soporte puede ser de milisegundos a minutos.

Además, la justificación económica de los sistemas de almacenamiento por baterías para regulación de frecuencia podría variar según las características propias de la operación del sistema eléctrico analizado.

Reserva

La capacidad de reserva es esencialmente una generación de respaldo para la red eléctrica, para su uso si una o dos fuentes de energía grandes no están disponibles de forma inesperada. Por lo tanto, al utilizar el almacenamiento como capacidad de reserva de suministro eléctrico, la necesidad y el costo de las reservas basadas en la generación se compensan y, en menor medida, los costos de operación incurridos para la capacidad de reserva basada en la generación se reducen / evitan. La cantidad de capacidad de reserva necesaria depende de las normas relacionadas con la confiabilidad del suministro eléctrico (generalmente, 10 a 20% de la capacidad de suministro eléctrico normal). Cuando está cargado, el almacenamiento puede, en la mayoría de los casos, proporcionar reservas simplemente al estar listo para descargar. Además, las reservas se necesitan con poca frecuencia, por lo que el almacenamiento utilizado para la capacidad de reserva en realidad se descarga con poca frecuencia. Eso le da al almacenamiento una ventaja sobre las reservas de hilatura basadas en la generación, ya que la generación utilizada debe estar realmente "girando" y lista para recuperar la carga en cualquier momento.

Figura 83: Ejemplo de aplicaciones de los Sistemas de Almacenamiento en la Red Eléctrica.



Referencia: (Grid Scale Energy Storage Systems, s.f.)

IMPACTOS AMBIENTALES

Al momento de evaluar y de comparar las distintas fuentes de energía que pueden ser utilizadas para la producción eléctrica, cada vez cobran mayor importancia las consideraciones referidas a su impacto ambiental. Estas consideraciones son tan importantes que están afectando decisivamente la configuración del futuro energético de muchos países.

En la actualidad, la generación de energía eléctrica se realiza optimizando los sistemas de producción para minimizar y eliminar los contaminantes; esto es gracias a la evolución tecnológica. Debido a esto, es posible utilizar combustibles con un alto poder energético generando un menor impacto ambiental y a la vez emplear materias primar que de lo contrario no serían aprovechadas.

Como cualquier otra actuación humana, las actividades necesarias para generar, transportar y distribuir la electricidad dan lugar a determinados efectos sobre el medio ambiente que se controlan y se tratan de minimizar, mediante medidas preventivas y correctoras.

La generación de energía eléctrica conlleva el consumo de recursos naturales (principalmente combustibles), emisiones a la atmósfera que generan de forma directa e indirecta una serie de impactos tanto a nivel local como global.

Cada tecnología de generación de energía eléctrica presentada tiene sus ventajas y desventajas operativas, innovación, costos, riesgos e impactos ambientales.

Dentro de esos impactos ambientales pueden mencionarse los siguientes:

1. **Impactos locales:**
   1.1. **Explotación de los suelos:** La producción, transporte, almacenamiento y consumo de energía suponen una

importante ocupación de suelos, y desplazan otros usos de la corteza terrestre.

1.2. **Agotamiento progresivo de los recursos de origen fósil no renovables:** Hay un gran número de las fuentes actuales de energía que son recursos no renovables, con riesgo de agotamiento, con el consiguiente impacto en las generaciones futuras.

1.3. **Generación de residuos sólidos:** La producción y consumo de energía produce residuos sólidos, que a menudo son de difícil y costoso tratamiento para evitar impactos ambientales significativos. Los residuos radioactivos representan un problema particularmente importante.

1.4. **Contaminación del aire:** La producción, transporte y consumo de energía es hoy fuente de emisiones atmosféricas: el dióxido de carbono, los óxidos de azufre y de nitrógeno, el metano, el monóxido de carbono, los metales pesados, las partículas en suspensión y los clorofluorocarbonos, son algunos de los contaminantes principales.

1.5. **Contaminación del suelo y del agua:** La producción, transporte y consumo de energía es hoy fuente de emisiones atmosféricas: el dióxido de carbono, los óxidos de azufre y de nitrógeno, el metano, el monóxido de carbono, los metales pesados, las partículas en suspensión y los clorofluorocarbonos, son algunos de los contaminantes principales.

1.6. **Contaminación visual:** Las instalaciones de generación de energía eléctrica conllevan un impacto visual, que puede ser significativo cuando se afecta a un entorno natural. En lo relativo a la distribución de energía eléctrica, el impacto visual más significativo es el de las redes y de las diferentes actuaciones acometidas a su alrededor en entornos en algunos casos con un alto valor ambiental.

1.7. **Contaminación auditiva:** Otro de los impactos de la generación y distribución de la energía eléctrica es la inevitable generación de ruidos. La huella sonora de las instalaciones está determinada por su ubicación y por sus condiciones técnicas, por lo que no se puede generalizar el impacto para todas las instalaciones.

2. **Impactos globales:**

2.1. **Contribución al cambio climático:** En la generación de energía eléctrica en centrales térmicas, la quema de combustibles fósiles da lugar a emisiones de dióxido de carbono (CO_2) y óxido nitroso (N_2O). Con el fin de minimizar lo máximo posible estas emisiones, se tiene en cuenta el valor calorífico neto de los combustibles utilizados (contenido energético), su factor de emisión de CO_2 y N_2O (emisiones por cantidad de combustible utilizado) y las tecnologías disponibles (incremento de eficiencia energética), como consecuencia de la acentuación del efecto

invernadero. Con sus consecuencias, entre otras, de posible subida del nivel del mar, extensión de la aridización, y difusión de enfermedades.

2.2. **Reducción drástica de la capa de ozono:** En los años setenta se descubrió que ciertos productos químicos, clorofluorocarbonos, o CFCs, usados hasta entonces como refrigerantes y como propelentes en los aerosoles, dan lugar a la destrucción de la capa de ozono que rodea el planeta tierra, presenta consecuencias para la salud humana (mayores cánceres de piel y enfermedades de visión, por ejemplo).

2.3. **Incremento en la formación de lluvias ácidas:** La lluvia ácida es un fenómeno ambiental generado por las emisiones de óxidos de nitrógeno y azufre a la atmósfera, tiene consecuencias negativas para los ecosistemas y para las infraestructuras humanas. No se trata de un fenómeno local, ya que las emisiones de estas sustancias pueden dar lugar a lluvias ácidas a miles de kilómetros de distancia del foco de emisiones.

2.4. **Pérdida de los ecosistemas y biodiversidad:** La conservación de la biodiversidad se viene haciendo más difícil a lo largo de los años con el actual desarrollo económico. Debido a esto, disminución de la biodiversidad es un grave problema no sólo estético y cultural, sino también, y, sobre todo, de disminución de la información genética que necesitamos para producir nuevos fármacos y materiales.

Si bien las energías renovables no utilizan combustibles fósiles en su generación esto no es suficiente argumento como para aseverar que son tecnologías que no impactan el medioambiente. Si la matriz de generación energética es optimizada basándose únicamente en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, nuevos impactos podrían ser introducidos en la región estudiada a partir de otras emisiones (por ejemplo, NOx y SO2).

Así, se vuelve imperante una nueva perspectiva respecto a los impactos ambientales que puede ocasionar la generación eléctrica, de modo de tener claridad de los impactos transversales de estas tecnologías y entregar elementos de análisis que puedan servir para balancear la penetración de cada tecnología de generación renovable no convencional.

La herramienta de análisis de ciclo de vida (ACV) es cada vez más utilizada a nivel nacional e internacional y ha demostrado su utilidad en todos los campos de producción/generación. La metodología de ACV permite la evaluación de impactos ambientales en productos y servicios a lo largo de todo su ciclo de vida.

El análisis de ciclo de vida es una herramienta de toma de decisiones muy útil a la hora de seleccionar entre diferentes alternativas que proveen de un mismo producto, en este caso la energía.

La Figura 84 es una representación visual del ciclo de vida general para cualquier fuente de generación.

Figura 84: Aspectos considerados en un Análisis de Ciclo de Vida para un recurso energético

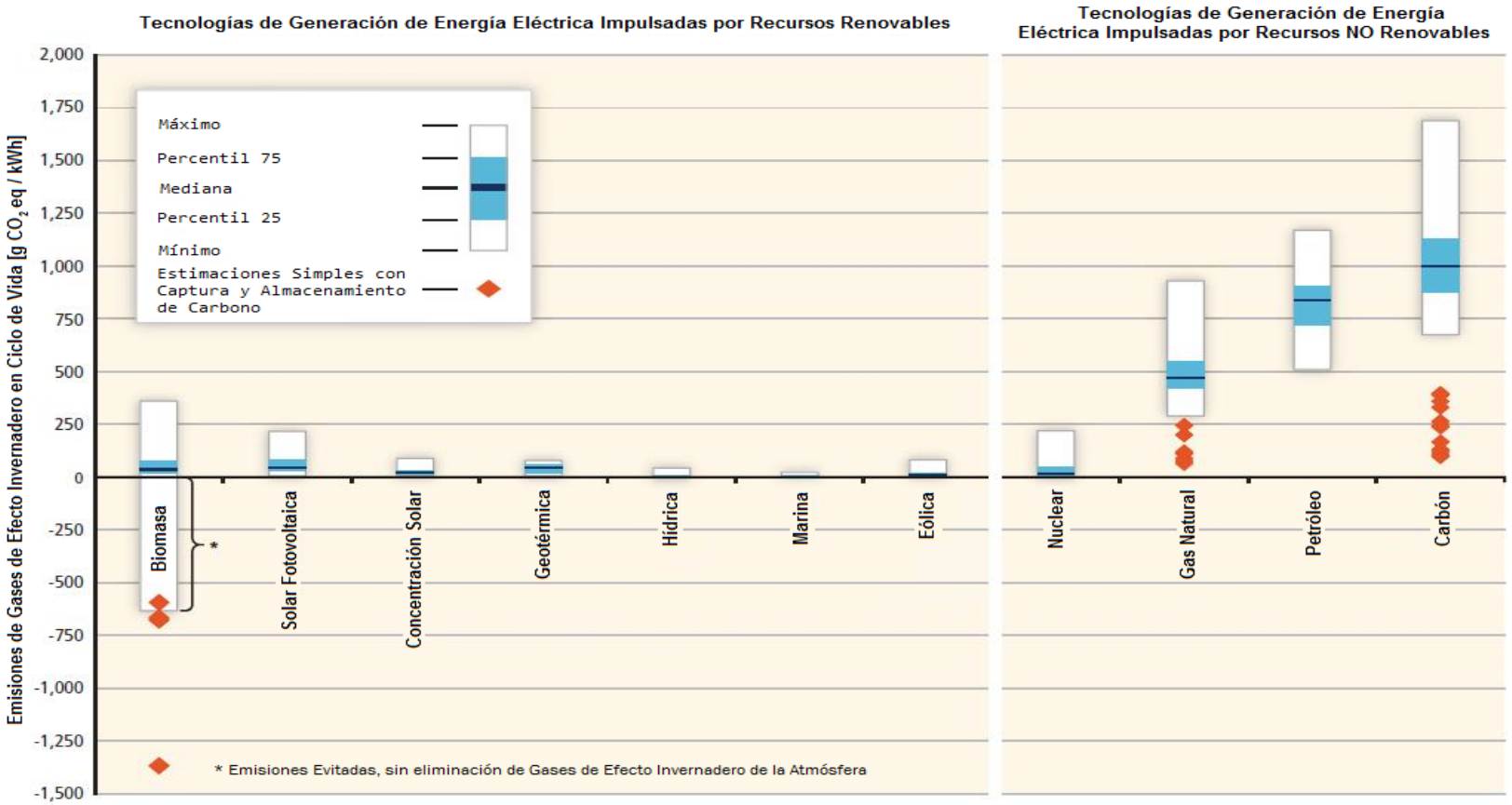


Referencia: (National Renewable Energy Laboratory, 2013).

Las tecnologías más responsables por impactos negativos al ambiente son aquellas dependientes de combustibles fósiles como el carbón y derivados del petróleo; seguidamente por las centrales que operan con gas natural y por las centrales nucleares por sus nocivos residuos de índole radiactiva. Por otra parte, tecnologías de generación con recursos renovables presentan huellas de carbono muy bajas, esto se muestra en la Figura 85.

A pesar de que estas tecnologías renovables no liberan emisiones de gases de efecto invernadero al ambiente como lo hacen las termoeléctricas convencionales, las principales fuentes de huellas de carbono surgen de los procesos de extracción de la materia prima y manufactura de los materiales de construcción. Dentro de los elementos de construcción que contribuyen a las huellas de carbono pueden mencionarse: las aspas de las turbinas de viento para los parques eólicos, los paneles de silicio cristalino para los parques solares fotovoltaicos y los espejos reflectores en centrales de concentración solar.

Figura 85: Huellas de Carbono de diferentes tecnologías de Generación



Referencia: (National Renewable Energy Laboratory, 2011)

REFERENCIAS

Isothermal Compressed Air Energy Storage. (2012, Octubre). Retrieved from https://www.energy.gov/sites/prod/files/SustainX.pdf

Appa renovables. (2022). *¿Qué es la energía marina?* Retrieved from https://www.appa.es/appa-marina/que-es-la-energia-marina/

Apteligent. (2016, Octubre 26). *Li-ion Batteries in the Hot Seat (A Primer on the Science of Exploding Smartphones)!* Retrieved from http://www.apteligent.com/2016/10/li-ion-batteries-hot-seat-primer-science-exploding-smartphones/

Aqua Helica. (n.d.). *Hidro tornillo como micro central eléctrica*. Retrieved from http://www.ib-deutschmann.de/html/body_hydroenergie.html

Betsolar. (2023). *Estructuras flotantes*. Retrieved from https://betsolar.es/producto/estructuras-2/

Caloryfrio. (2016, Febrero 2). *Usos de la energía geotérmica en función de su temperatura*. Retrieved from https://www.caloryfrio.com/energias-renovables/geotermia/usos-energia-geotermica-en-funcion-temperatura.html

Canary Systems. (2016, Agosto). *Project Profile: Rocky Mountain Pumped Storage Hydroelectric Plant*. Retrieved from http://canarysystems.com/2016/08/project-profile-rocky-mountain-pumped-storage-hydroelectric-plant/

Carrera por Energía Solar Espacial. (2017, Febrero 24). Retrieved from Proyectos FSE: http://www.proyectofse.mx/2016/10/05/la-carrera-por-la-energia-solar-espacial/

Chemical Glossary. (2017, Agosto 29). *Lead-acid battery*. Retrieved from https://glossary.periodni.com/glossary.php?en=lead-acid+battery

Department of Energy U.S. (n.d.). *Offshore Wind Transmission Federal Planning & Support*. Retrieved from https://www.energy.gov/gdo/offshore-wind-transmission-federal-planning-support

Deutsche Welle. (2016, Junio 15). *Hydrogen and wind: Allies for sustainable energy*. Retrieved from http://www.dw.com/en/hydrogen-and-wind-allies-for-sustainable-energy/a-19330382

E&I Consulting. (n.d.). Retrieved from http://energystorage.org/energy-storage/energy-storage-benefits/benefit-categories/grid-operations-benefits

El Mundo. (2022, Mayo 5). *Las cometas que quieren revolucionar la generación de energía eólica*. Retrieved from https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.elmundo.es%2Fciencia-y-salud%2Fmedio-ambiente%2F2022%2F05%2F05%2F6262d61ee4d4d80e128b457e.html&psig

=AOvVaw0RsFjIBuQlo89NnGmFHKCg&ust=1691502448645000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=2ahUKEwik6fzl

Energy Review. (2020, Mayo 15). *Los paneles solares de grafeno una nueva solución para instalaciones de pequeña escala*. Retrieved from https://www.review-energy.com/solar/los-paneles-solares-de-grafeno-una-nueva-solucion-para-instalaciones-de-pequena-escala

Energy Sources and Energy Use. (2018). Retrieved from https://www.nationalgeographic.org/activity/energy-sources-and-energy-use/

Energy Storage News. (2019, Febrero 8). *Energy Storage News*. Retrieved from https://www.energy-storage.news/news/uae-integrates-648mwh-of-sodium-sulfur-batteries-in-one-swoop

Energy Storage Technologies in the Electricity grid. (2017, Septiembre). Retrieved from https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/12027/396460.pdf?sequence=1

Energy Storage Toolbox. (2018). *Energy Storage Toolbox*. Retrieved from https://estoolbox.org/index.php/8-samples/8-tes-introduction

Energy Techonology Systems Analysis Programme & International Renewable Energy Agency. (2016, Marzo). *Wind Power - Technology Brief*. Retrieved from https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA-ETSAP_Tech_Brief_Wind_Power_E07.pdf

ETESA. (2019).

ETESA. (2023). Retrieved from https://www.cnd.com.pa/index.php/informes/categoria/informes-de-mercado?tipo=1118

ETESA. (2025). *ETESA*.

ETSI. (n.d.). *Captador solar fresnel - Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla*. Retrieved from https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/12072/fichero/Memoria%252FCap%C3%ADtulo+2.pdf

EV Lithium. (n.d.).

Formosa, C. P. (2018, Agosto 1). *Definición de energía solar*. Retrieved from https://www.ingenierosformosa.com.ar/?pag=leer&id=91

Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. (n.d.). *Power to Gas*. Retrieved from https://www.ise.fraunhofer.de/en/business-areas/hydrogen-technologies/hydrogen-production-by-water-electrolysis/power-to-gas.html

Generadoras de Chile. (2021). *Energía Eólica*. Retrieved from http://generadoras.cl/tipos-energia/energia-eolica

geologiaymedioambiente. (2015, Febrero). Retrieved from https://geologiaymedioambiente.com/2015/02/turbinas-eolicas-flotantes/

Grid Scale Energy Storage Systems. (n.d.). Retrieved from https://www.mpoweruk.com/grid_storage.htm

Heliovis. (2020). *heliovis*. Retrieved from https://heliovis.com/technology/

Huang, Y., Chen, H., Zhang, X., Keatley, P., Huang, M., Vorushylo, I., . . . Hewitt, N. (2017, Mayo). *Techno-economic Modelling of Large Scale Compressed Air Energy Storage Systems*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/317305678_Techno-economic_Modelling_of_Large_Scale_Compressed_Air_Energy_Storage_Systems?_sg=98g6HIPX22Wy_OuHwHQyzCRElMuObcwOi-_W3TD0HKjWISWAilEgmERoSO9kl8Edv5o1s86lvDHTozAmMMRHbaaZqv1WmhiEWw

IBM. (2012, Abril 20). *IBM Battery 500 - IBM creates breathing, high-density, light-weight lithium-air battery*. Retrieved from http://www.extremetech.com/computing/126745-ibm-creates-breathing-high-density-light-weight-lithium-air-battery

Ingemecánica. (n.d.). *Planta Termosolar con Tecnología de Torre*. Retrieved from https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn134.html

Ingeoexpert. (2018, marzo 22). *Ingeoexpert*. Retrieved from https://ingeoexpert.com/2018/03/22/como-funciona-una-central-hidroelectrica/

International Fleet World. (2018, Septiembre). Retrieved from https://internationalfleetworld.com/whatever-happened-to-hydrogen/

International Renewable Energy Agency. (2014). *IRENA*. Retrieved from irena.org

IRENA. (2020). *www.irena.org*. Retrieved from https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Innovation-outlook-Thermal-energy-storage

Irena Electricity Storage Cost. (2017). Retrieved from https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf

ITSE. (2020, Noviembre 17). *Promueven el conocimiento en energía solar térmica para combatir el cambio climático*. Retrieved from https://www.itse.ac.pa/Promueven-el-conocimiento-en-energia-solar-termica-para-combatir-el-cambio-climatico

Jóhannesson, T., & Chatenay, C. (2014, Marzo). *Direct Use of Geothermal Resources*. Retrieved from https://orkustofnun.is/gogn/unu-gtp-sc/UNU-GTP-SC-18-20.pdf

Kawasaki. (2018). *Battery Energy Storage System - GIGACELL - Frequently Asked Questions*. Retrieved from

http://global.kawasaki.com/en/energy/solutions/battery_energy/questions/index.html

Kim, K. J., Park, M.-S., Kim, Y.-J., Kim, J. H., Dou, S., & Skyllas-Kazacos, M. (2015, Junio 9). *A technology review of electrodes and reaction mechanisms in vanadium redox flow batteries*. Retrieved from http://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2015/ta/c5ta02613j/unauth#!divAbstract

Kougias, I. (2019, Octubre). *sciencedirect.com*. Retrieved from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119304575

Laboratory National Renewable Energy. (2019). Retrieved from https://www.nrel.gov/news/features/2019/beneath-solar-panels-the-seeds-of-opportunity-sprout.html

LACYQS. (2015). *Canal parabólico y fresnel*. Retrieved from https://concentracionsolar.org.mx/concentracion-solar/canal-parabolico-y-fresnel

Memarsa. (2023). *¿Qué es la energía solar?* Retrieved from http://www.instalaciones-electricas.net/que-es-la-energia-solar/

MeyGen // Nova Scotia. (n.d.). *simecatlantis.com // offshore-energy.biz*. Retrieved from https://simecatlantis.com/projects/meygen/ -- https://www.offshore-energy.biz/nova-scotia-drops-cape-sharp-tidal-turbine-project/

Millennium Energy Systems. (2016). *Colector Solar Fresnel*. Retrieved from http://www.millenniumenergies.com/wp-content/uploads/2016/02/FICHA-FRESNEL-MES.pdf

Ministerio de Ambiente. (2022, Julio 19). *Proyecto Termosolar: En tres hospitales panameños mitigarán el impacto del cambio climático al generar agua caliente sin emisiones (CO2).*

MITECO. (2021, Febrero). Retrieved from https://www.miteco.gob.es/es/prensa/estrategiadealmacenamientoenergetico_tcm30-522655.pdf

ML-Ingesol. (2023). *Energía solar fotovoltaica*. Retrieved from https://ml-ingesol.com.ar/alumbrados-autonomos/

Murata. (n.d.). *The Structure and Principle of Electrical Double Layer Capacitor*. Retrieved from https://www.murata.com/en-us/products/capacitor/edlc/techguide/principle

National Renewable Energy Laboratory. (2011). *Life Cycle Assessment Harmonization*. Retrieved from https://www.nrel.gov/analysis/life-cycle-assessment.html

National Renewable Energy Laboratory. (2012, Junio). Retrieved from https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/52409-2.pdf

National Renewable Energy Laboratory. (2013, Enero). *Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Electricity Generation*. Retrieved from https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/57187.pdf

New Energy and Fuel. (2010, Junio 15). *Wind to Fertilizer Construction Begins*. Retrieved from https://newenergyandfuel.com/http:/newenergyandfuel/com/2010/06/15/wind-to-fertilizer-construction-begins/

Nomura, S. (2015). *Store Electricity! - Opening of Energy Technology by Zero Electrical Resistance*. Retrieved from http://www.meiji.ac.jp/cip/english/frontline/nomura/index.html

Nuclear Power. (2014). *BWR - Boiling Water Reactor*. Retrieved from https://www.nuclear-power.net/bwr-boiling-water-reactor/

Nuclear Power. (2014). *Nuclear Power Plant*. Retrieved from https://www.nuclear-power.net/nuclear-power-plant/

Nuclenor. (2007). *Cuestiones sobre la Energía*. Retrieved from https://www.nuclenor.org/aula/222_07/capitulo8.htm#:~:text=El%20combustible%20nuclear%20se%20encuentra,se%20llama%20un%20reactor%20nuclear.

Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. (2013, Agosto). *Linear Concentrator System Basics for Concentrating Solar Power*. Retrieved from https://www.energy.gov/eere/solar/articles/linear-concentrator-system-basics-concentrating-solar-power

OVACEN. (2022). *Ventanas fotovoltaicas luminiscentes*. Retrieved from https://ovacen.com/ventanas-luminiscentes/

Pérez Porto, J. G. (2014, agosto 12). *Definición.DE*. Retrieved from Hidroeléctrica - Qué es, definición y concepto: https://definicion.de/hidroelectrica/

Plataforma Arquitectura. (2019, Febrero 21). Retrieved from https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/911968/veredas-que-generan-energia-a-traves-de-los-pasos-de-los-peatones

Powerthru. (2016). *Carbon Fiber Flywheel Technology for Government Applications*. Retrieved from http://www.power-thru.com/carbon_fiber_flywheel_technology.html

ProyectoFSE. (2018, Junio). *¿Sabes cómo funciona una turbina eólica de eje vertical?* Retrieved from http://www.proyectofse.mx/2018/06/28/turbina-eolica-de-eje-vertical/

Reactor Heavy Water. (2016). Retrieved from https://askeyphysics.org/2016/05/14/516-520-wkepowertorque/candu-reactor-schematic/

Renovables Verdes. (n.d.). *Energía maremotérmica*. Retrieved from https://www.renovablesverdes.com/energia-maremotermica/

Reve. (2012, Noviembre 7). *Construirán en Salta la primera termosolar de Argentina con una inversión de 100 millones de dólares*. Retrieved from https://www.evwind.com/2012/11/07/construiran-en-salta-la-primera-termosolar-de-argentina-con-una-inversion-de-100-millones-de-dolares/

Salgado, M., Zepeda, J., Prado, M. d., Villalobos, J., & Cruz, R. (2019, Octubre). *Celda biofotovoltaica para la generación de energía eléctrica a través de plantas vivas*. Retrieved from https://www.academia.edu/40802176/Celda_biofotovoltaica_para_la_generaci%C3%B3n_de_energ%C3%ADa_el%C3%A9ctrica_a_trav%C3%A9s_de_plantas_vivas

Saur Energy. (2019, Febrero 6). Retrieved from https://www.saurenergy.com/solar-energy-news/abu-dhabi-commissions-worlds-largest-storage-battery

Save the Earth. (2016, Diciembre). *The Limitless Power of Geothermal Energy* . Retrieved from https://savetheearth.coop/blog/power-geothermal-energy/

Scottish Renewables. (2016, Agosto). *The Benefits of Pumped Storage Hydro to the UK*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/312098425_The_Benefits_of_Pumped_Storage_Hydro_to_the_UK?_sg=3C5eh1Y9_mxzl_ifRNKuPnI7lXgv9sUpaATDLjpgTdH754UEnPQeTC3EmZv3OX5HIwQVQqSZTgtif4sM7KOCrUcNbD2A8MEXOA

Solar Reviews. (2022, Septiembre 26). *Smartflower solar tracker: a change for residential solar?* Retrieved from https://www.solarreviews.com/blog/solar-flower-smartflower-solar-tracker

Storage Battery Solutions, LLC. (2018). *Stationary / Standby Power*. Retrieved from http://www.sbsbattery.com/products-services/by-application/stationary-standby-power.html

The Agency for Science, Technology and Research. (2017, Enero 14). *A breath of fresh air: Improving zinc-air batteries*. Retrieved from https://www.sciencedaily.com/releases/2017/01/170114191153.htm

The National Academies Press. (2013). Retrieved from https://www.nap.edu/read/13355/chapter/6

Turbulent. (2022). *turbulent.be*. Retrieved from https://www.turbulent.be/

Universidad de Valladolid. (2016). *Sistemas de Almacenamiento de Energia*. Retrieved from https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/18325/1/TFG-P-432.pdf

Universidad Distrital Fransisco José de Caldas. (2015). *ANÁLISIS TÉCNICO DE LOS DIFERENTES TIPOS DE BATERÍAS*. Retrieved from http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/3663/1/ANA%CC%81LISIS%20TE%CC%81CNICO%20DE%20LOS%20DIFERENTES%20TIPOS%20DE%20

BATERI%CC%81AS%20COMERCIALMENTE%20DISPONIBLES%20PARA%20SU%20INTEGRACIO%CC%81N%20EN%20EL%20PROYECTO%20DE%20UNA%20MICRORRED%20AI

Universidad Tecnolófica Nacional - Buenos Aires. (2016). *Aprovechamiento de la Energía Undimotriz*. Retrieved from https://docplayer.es/9771882-Aprovechamiento-de-la-energia-undimotriz.html

Universidad Tecnológica Nacional - Buenos Aires. (2022, Abril 9). *El Proyecto Undimotriz avanza en el diseño del convertidor a escala real y en su instalación en el puerto marplatense*. Retrieved from https://undimotriz.frba.utn.edu.ar/el-proyecto-undimotriz-avanza-en-el-diseno-del-convertidor-a-escala-real-y-en-su-instalacion-en-el-puerto-marplatense/

University of Bristol. (n.d.). *Tidal lagoons and offshore wind*. Retrieved from https://www.bristol.ac.uk/cabot/research/casestudies/2017/tidal-lagoons.html

University of Southern California. (2010, Noviembre 10). *Get That "Just Right" Feel: Incorporating Phase Change Materials Into Textiles*. Retrieved from http://illumin.usc.edu/2/get-that-34just-right34-feel-incorporating-phase-change-materials-into-textiles/

Vortex Bladeless. (n.d.). Retrieved from https://vortexbladeless.com/es/tecnologia/

Wang, B., & Bauer, S. (2017, Abril 27). *Compressed air energy storage in porous formations: a feasibility and deliverability study*. Retrieved from https://pubs.geoscienceworld.org/pg/article/23/3/306/519394/compressed-air-energy-storage-in-porous-formations

Wikipedia. (2023, Julio 6). *Central termoeléctrica solar de torre*. Retrieved from https://es.wikipedia.org/wiki/Central_termoel%C3%A9ctrica_solar_de_torre

Wind for Future Magazine. (2020, Septiembre 29). *Solar Panel Highways – How do they Work?*

Windpower - Engineering&Development. (2018, Abril 17). *SheerWind's novel INVELOX wind-turbine patent portfolio up for auction*. Retrieved from https://www.windpowerengineering.com/sheerwinds-novel-invelox-wind-turbine-patent-portfolio-up-for-auction/

Windpower Engineering & Develpment. (2014, Abril 28). *Underwater compressed-air storage making good progress*. Retrieved from https://www.windpowerengineering.com/business-news-projects/underwater-compressed-air-storage-making-good-progress/

Yuba. (2015, Marzo 5). *Aplicaciones de la energía solar térmica*. Retrieved from http://www.yubasolar.net/2015/03/aplicaciones-de-la-energia-solar-termica.html