

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas
Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico

Estudio comparativo de las tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica

Trabajo de grado presentado ante la Ilustre Universidad Técnica del Norte previo a la obtención del título de grado de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico

Autor:
Byron David Herrería Romero

Tutor:
MSC. Jhonny Javier Barzola Iza

Ibarra – Ecuador

2022



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN

A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

| DATOS DE CONTACTO | | | |
|-----------------------------|-----------------------------|------------------------|------------|
| CÉDULA DE IDENTIDAD: | 0401777503 | | |
| APELLIDOS Y NOMBRES: | Herrería Romero Byron David | | |
| DIRECCIÓN: | El Ángel, Calle Sucre | | |
| EMAIL: | bdherreriar@utn.edu.ec | | |
| TELÉFONO FIJO: | | TELÉFONO MÓVIL: | 0961699925 |

| DATOS DE LA OBRA | |
|--------------------------------|--|
| TÍTULO: | Estudio comparativo de las tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica |
| AUTOR (ES): | Herrería Romero Byron David |
| FECHA: DD/MM/AAAA | 7/11/2022 |
| SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO | |
| PROGRAMA: | <input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO |
| TITULO POR EL QUE OPTA: | Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico |
| ASESOR /DIRECTOR: | MSc. Jhonny Javier Barzola Iza |

1. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 7 días del mes de noviembre de 2022

EL AUTOR:

(Firma).....



Nombre: BYRON DAVID HERRERIA ROMERO



UNIVERSIDAD TECNICA DEL NORTE

F.I.C.A

CERTIFICACION DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

Yo, Jhonny Javier Barzola Iza en calidad de tutor del señor estudiante Byron David Herrería Romero certifica que ha culminado con las normas establecidas en la elaboración del trabajo de investigación titulado: **“ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA”**

Para la obtención del título de ingeniero en Mantenimiento Eléctrico, aprobado la defensa, Impresión y empastado.

.....
MSc. Jhonny Javier Barzola Iza
DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

DEDICATORIA

“El presente trabajo de grado se lo dedico:

A mis padres, Wilson German y Dolores María que con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir este objetivo y no dejarme rendir ante cualquier adversidad

A mis hermanos Ricardo y Nayeli por su cariño y apoyo incondicional, durante toda mi vida

A todos mis familiares, amigos más allegados por ser parte de este proceso de crecimiento personal y profesional.”

AGRADECIMIENTO

Mi más sincero agradecimiento a toda mi familia por siempre apoyarme, en especial a mis padres y hermanos por ser los pilares fundamentales en mi vida que me ayudaron a poder cumplir esta meta

A mis amigos, "EB" con los que compartí muchas experiencias fuera de las aulas, y a mis compañeros que me brindaron su apoyo en clase, muchas gracias por todo

A la prestigiosa Universidad Técnica del Norte, por brindarnos la oportunidad de formarnos en ella. A la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, a la carrera Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico y a todos sus docentes por habernos instruido durante nuestra formación académica.

Tabla de contenido

| | |
|---|------|
| <i>IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA</i> _____ | II |
| <i>CONSTANCIAS</i> _____ | III |
| <i>ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR</i> _____ | IV |
| <i>DEDICATORIA</i> _____ | V |
| <i>AGRADECIMIENTO</i> _____ | VI |
| <i>RESUMEN</i> _____ | XI |
| <i>ABSTRACT</i> _____ | XII |
| <i>INTRODUCCIÓN</i> _____ | XIII |
| A.1 CONTEXTO _____ | XIII |
| A.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA _____ | XIV |
| A.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA _____ | XIV |
| A.4 JUSTIFICACIÓN _____ | XIV |
| A.5 ALCANCE _____ | XV |
| A.6 OBJETIVO GENERAL _____ | XV |
| A.7 OBJETIVOS ESPECÍFICOS _____ | XV |
| <i>CAPÍTULO 1</i> _____ | 1 |
| <i>Revisión del estado del arte</i> _____ | 1 |
| 1.1 Definición de energía renovable _____ | 1 |
| 1.2 Energía renovable _____ | 1 |
| 1.3 Energía no renovable (Brown Energy) _____ | 1 |
| 1.4 Energía Sostenible _____ | 1 |
| 1.5 ¿Por qué surgen los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica? _____ | 1 |
| 1.6 Sistemas de almacenamiento energía eléctrica _____ | 2 |
| 1.7 Tipos de sistemas de almacenamiento de energía _____ | 2 |
| 1.7.1 Mecánicos: _____ | 2 |
| 1.7.2 Electroquímicos: _____ | 2 |
| 1.7.3 Eléctricos: _____ | 2 |
| 1.5.4 Térmicos: _____ | 3 |
| 1.8 Mecánicos _____ | 3 |
| 1.8.1 Almacenamiento hidráulico bombeado (Pumped Hydro Storage) _____ | 3 |
| 1.8.2 Almacenamiento de energía por aire comprimido (Compressed Air Energy Storage) _____ | 5 |
| 1.8.3 Volantes de inercia (FESS) _____ | 9 |
| 1.9 Electroquímicos _____ | 11 |
| 1.9.1 Batería de ácido sólido (Lead Acid battery) _____ | 11 |
| 1.9.2 Plomo-Ácido _____ | 11 |
| 1.9.3 Pilas de combustible (Fuel Cell) _____ | 13 |
| 1.9.4 Baterías de litio _____ | 16 |
| 1.10 Eléctricos _____ | 17 |
| 1.10.1 Supercondensador (SuperCapacitor) _____ | 17 |

| | |
|--|-----------|
| 1.11 Térmicos _____ | 19 |
| 1.11.1 Almacenamiento de energía térmica (Thermal Energy Storage) _____ | 19 |
| 1.13 Comparación de sistemas de almacenamiento eléctrico _____ | 21 |
| 1.14 Tabla comparativa de los sistemas de almacenamiento de energía _____ | 24 |
| CAPÍTULO 2 _____ | 25 |
| <i>Análisis de la matriz energética del Ecuador</i> _____ | 25 |
| 2.1 Introducción _____ | 25 |
| 2.2 Metodología _____ | 25 |
| 2.3 Matriz energética _____ | 25 |
| 2.3.1 Estadísticas del sector eléctrico _____ | 26 |
| 2.3.2 Producción neta de energía _____ | 26 |
| 2.3.3 Producción energética _____ | 27 |
| 2.3.4 Histórico producción energética _____ | 28 |
| 2.3.5 Empresas de generación y autogeneración _____ | 29 |
| 2.3.6 Centrales de generación con fuentes de energía renovable _____ | 30 |
| 2.3.7 Centrales de generación con fuentes de energía no renovable _____ | 31 |
| 2.3.8 Centrales de generación de sistemas aislados _____ | 32 |
| 2.4 Fuentes de generación de energía eléctrica en el Ecuador _____ | 34 |
| 2.4.1 Generación hidroeléctrica _____ | 34 |
| 2.4.2 Generación Eólica _____ | 37 |
| 2.4.3 Generación de Biomasa _____ | 39 |
| 2.4.4 Generación Fotovoltaica _____ | 40 |
| 2.4.5 Generación Geotérmica _____ | 41 |
| CAPÍTULO 3 _____ | 43 |
| <i>Tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica que se pueden utilizar en el Ecuador</i> _____ | 43 |
| 3.1 Metodología _____ | 43 |
| 3.2 Tecnológicas de almacenamiento eléctrico _____ | 43 |
| 3.2.1 Almacenamiento mecánico _____ | 44 |
| 3.2.2 Almacenamiento químico _____ | 45 |
| 3.2.3 Almacenamiento térmico _____ | 45 |
| 3.3 Clasificación de los sistemas de almacenamiento de energía _____ | 46 |
| 3.3.1 Almacenamiento de energía a gran escala _____ | 46 |
| 3.3.2 Almacenamiento en redes _____ | 48 |
| 3.3.3 Almacenamiento de energía a nivel de usuario _____ | 50 |
| 3.4 Aplicación de la tecnología _____ | 51 |
| 3.4.1 Almacenamiento hidráulico bombeado _____ | 52 |
| 3.4.2 Almacenamiento térmico _____ | 52 |
| 3.4.3 Almacenamiento Electroquímico _____ | 55 |
| 3.5 Comparación de tecnologías de almacenamiento de energía que se pueden utilizar en el Ecuador _____ | 60 |
| 3.6 Tecnología de almacenamiento más viable para utilizar en el Ecuador _____ | 61 |
| Almacenamiento hidráulico por bombeo _____ | 61 |
| Conclusiones _____ | 66 |
| Recomendaciones _____ | 67 |
| Bibliografía _____ | 68 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| <i>TABLA 1.1 Características principales de las pilas de combustible</i> | 15 |
| <i>TABLA 1.2 Clasificación y comparación de varios sistemas de almacenamiento de energía.</i> | 24 |
| <i>TABLA 2.1 Generación por tipo de producción (GWh), 2020</i> | 27 |
| <i>TABLA 2.2 Empresas que cuentan con generación y autogeneración</i> | 30 |
| <i>TABLA 2.3 Potencia de centrales de generación en sistemas aislados</i> | 33 |
| <i>TABLA 2.4 Proyectos geotérmicos para la generación eléctrica en el país.</i> | 42 |
| <i>TABLA 3.1 Comparación de tecnologías de almacenamiento a gran escala</i> | 47 |
| <i>TABLA 3.2 Comparación de tecnologías de almacenamiento en red</i> | 49 |
| <i>TABLA 3.3 Comparación de tecnologías de almacenamiento a nivel de usuario.</i> | 50 |
| <i>TABLA 3.4 Comparación de tecnologías de almacenamiento de energía.</i> | 60 |
| <i>TABLA 3.5 Hidroeléctricas tipo pasada</i> | 62 |
| <i>TABLA 3.6 Hidroeléctricas tipo embalse de reserva</i> | 63 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Fig. 1.1 Partes de una central hidroeléctrica de bombeo | 4 |
| Fig. 1.2 Típica instalación de CAES | 6 |
| Fig. 1.3 Elementos principales planta CAES | 7 |
| Fig. 1.4 Esquema de un volante de energía | 9 |
| Fig. 1.5 Esquema funcionamiento de una pila de combustible | 14 |
| Fig. 1.6 Grupo de SuperCapacitor | 18 |
| Fig. 1.7 Circuito equivalente de un supercapacitor | 19 |
| Fig. 2.1 Producción bruta energética por tipo de generación (GWh), 2020 | 28 |
| Fig. 2.2 Producción bruta de energía (GWh), 1999 – 2020 | 29 |
| Fig. 2.3 Potencia nominal de centrales de generación con fuentes de energía renovable (MW) | 31 |
| Fig. 2.4 Potencia nominal de centrales de generación con fuentes de energía no renovable (MW) | 32 |
| Fig. 2.5 Esquema gráfico de la hidroeléctrica Coca Codo Sinclair. | 36 |
| Fig. 2.6 Central Eólica Villanoco | 38 |
| Fig. 3.1 Módulos de solidTES (62KWt - 300 KWh), | 53 |
| Fig. 3.2 Funcionamiento de una batería de calor | 54 |
| Fig. 3.3 Colector solar residencial | 55 |
| Fig. 3.4 Sistema de almacenamiento de baterías (BESA) | 56 |
| Fig. 3.5 Parte interna de un powerpack | 58 |
| Fig. 3.6 Tipos de vehículos donde aplicar la tecnología CATL | 59 |

RESUMEN

Hoy en día nos resulta difícil imaginar un mundo en el que no tengamos un suministro eléctrico capaz de iluminar nuestros hogares o alimentar nuestras fábricas. La energía eléctrica se ha convertido en una parte indispensable ya que estamos en constante contacto con dispositivos eléctricos que nos ayudan a realizar diversas tareas diariamente. A nivel mundial el uso de las nuevas tecnologías de generación de energía renovable es cada vez mayor e importante. Desde el descubrimiento de la electricidad, la humanidad ha buscado formas de almacenar energía para usarla cuando sea necesario. Los sistemas de almacenamiento de energía ofrecen una amplia gama de enfoques tecnológicos para crear una infraestructura más resistente y reducir los costos para los servicios públicos y los consumidores. Todos los sistemas de generación de energía eléctrica necesitan de una manera fácil de acumular la energía y no desperdiciarla. En la investigación se analizarán las principales tecnologías de almacenamiento de energía en la red eléctrica, así como futuras soluciones. Se examinan sus principales características, detallando las ventajas y desventajas de las diversas tecnologías involucradas. Posteriormente se detalla unas tablas comparativas de las fuentes de almacenamiento aptas para la utilización en el Ecuador

Palabras clave: Almacenamiento de energía, energía renovable, energía no renovable, redes inteligentes, energía eléctrica.

ABSTRACT

Today it is difficult for us to imagine a world in which we do not have an electrical supply, capable of lighting our homes or powering our factories. Electric power has become an indispensable part of our lives as we are in constant contact with electrical devices that help us perform various tasks on a daily basis. Globally, the use of new renewable energy generation technologies is becoming more and more important. Since the discovery of electricity, mankind has sought ways to store energy for use when needed. Energy storage systems offer a wide range of technological approaches to create a more resilient infrastructure and reduce costs for utilities and consumers. All electric power generation systems need an easy way to store energy and not waste it. The research will discuss the main energy storage technologies in the power grid, as well as future solutions. Their main characteristics are examined, detailing the advantages and disadvantages of the various technologies involved. Subsequently, some comparative tables of the storage sources suitable for use in Ecuador are detailed.

Keywords: Energy storage, renewable energy, non-renewable energy, smart grids, electric power.

INTRODUCCIÓN

A.1 CONTEXTO

En el pasado, los servicios públicos de sistemas de energía han operado en su forma más simple a través del transporte unidireccional desde grandes centrales eléctricas distantes hacia el punto de consumo ya sea industrial o doméstico. (Catalão and Bizuayehu 2017)

(Chen, Cong, and Yang 2015) afirma que: Con la introducción de recursos energéticos distribuidos y renovables, las aplicaciones de almacenamiento de energía eléctrica (EES) por sus siglas en inglés *Electrical Energy Storage* están regresando, tras el reconocimiento y el avance tecnológico de su función para agregar flexibilidad, controlar la intermitencia y proporcionar suministro de energía ininterrumpida a la red.

El almacenamiento de energía eléctrica (EES) se refiere a un proceso de convertir la energía eléctrica de una red eléctrica en una forma que pueda almacenarse para convertirla de nuevo en energía eléctrica cuando sea necesario (Coronel 2017). Dicho proceso permite almacenar energía eléctrica en momentos de baja demanda, bajo costo de generación o a partir de fuentes de energía intermitentes y ser utilizada en momentos de alta demanda, alto costo de generación o cuando no se dispone de otros medios de generación. (García 2017)

La energía eléctrica es un bien que se puede desperdiciar si no se conserva o consume. En particular, la electricidad generada mediante recursos energéticos renovables como la solar y la eólica, que no funcionan todo el tiempo y tienen grandes fluctuaciones debido a su naturaleza cambiante (Dunn, Kamath, and Tarascon 2016). Es difícil de ajustar en respuesta a las necesidades de la demanda. Por lo tanto, se necesitan medios de almacenamiento para evitar problemas de estabilidad. (Rodrigues, Bizuayehu, and Contreras 2018)

Entonces (Rodrigues et al. 2018) menciona: que los sistemas EES representan el vínculo crítico entre las cadenas de oferta y demanda de energía, que se erigen como un elemento clave para la creciente integración de las energías renovables en la red, así como para la difusión de la generación de energía distribuida y la viabilidad de los sistemas eléctricos autónomos.

En el sector de la energía minorista, el almacenamiento puede reducir los costos de energía mediante la reducción de picos, al tiempo que mejora la calidad de la energía, mejora la confiabilidad del servicio y evita el derrame de electricidad renovable (Ferreira, Garde, and Fulli 2016). Mientras que los sistemas de transmisión y distribución son responsables de trasladar la electricidad sobre largas distancias hasta los usuarios finales, los sistemas EES implican una dimensión temporal, proporcionando electricidad cuando se necesita. (Dunn et al. 2016)

Existen muchos mecanismos para almacenar la energía eléctrica como son: bombeo hidroeléctrico, supercondensador, baterías de litio, etc. por lo que se debatirá sobre las aplicaciones, la clasificación, las características técnicas, el progreso de la investigación, el desarrollo y el estado de despliegue de estas tecnologías EES. (Vargas and Garcia 2018)

A.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad existen muchas fuentes de energía eléctrica, entre las más conocidas tenemos la hidráulica, eólica, solar y biomasa. Por lo cual cada uno de los sistemas de generación de energía requiere un sistema de almacenamiento; para que en el momento que no se esté utilizando la energía generada esta no se desperdicie.

Por otro lado, la energía eléctrica puede ser fácilmente generada, transportada y transformada. Sin embargo, con los sistemas de almacenamiento que existen en la actualidad, no se ha logrado almacenar la energía eléctrica de forma práctica, fácil y barata. Lo que significa que toda la energía eléctrica debe ser generada en el momento y dependiendo de la demanda y, en consecuencia, las energías renovables de naturaleza no gestionable requieren el apoyo de los sistemas de almacenamiento para integrarse, evitar pérdidas de energía eléctrica en periodos de poca demanda y seguridad al sistema eléctrico.

A.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cuáles son tipos de tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica más aptos para la integración en nuestro país?

A.4 JUSTIFICACIÓN

Actualmente en un mundo que se encuentra en plena transición de las energías fósiles a las fuentes renovables, como la energía eólica y la solar, una mejora del almacenamiento de energía eléctrica resulta de vital importancia para respaldar estas tecnologías, asegurando que los sistemas de red estén equilibrados y contribuyendo a aprovechar al máximo cada megavatio verde generado.

Por lo tanto; la investigación va enfocada a comprender que tipos de sistemas de almacenamiento de energía eléctrica existen, comparar cada uno de los sistemas y orientar a la ciudadanía sobre los tipos de tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica que se pueden implementar en el país. Ya que en el Ecuador ya existen sistemas de generación de energía con recursos no renovables y la generación con recursos renovables está surgiendo de manera muy favorable; por lo que es necesario comprender cual es la mejor forma de conservar la energía evitar pérdidas de energía eléctrica en periodos valle.

A.5 ALCANCE

Con la realización de este trabajo de investigación de tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica, se pretende colaborar con una buena información a los técnicos en el área que estén buscando nuevas opciones para el almacenamiento de energía eléctrica. Ya que el almacenamiento eficiente de energía es un pilar fundamental de la transición energética que permite flexibilizar la producción de energía renovable y garantizar su integración en el sistema.

En el desarrollo de la investigación se va a comparar las mejores tecnologías de almacenamiento de la energía eléctrica a nivel mundial, para tener el conocimiento de los tipos de tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica se puede implementar en nuestro país; teniendo en cuenta los sistemas de generación disponibles en el Ecuador en base a la matriz energética eléctrica nacional.

A.6 OBJETIVO GENERAL

Analizar los distintos tipos de tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica, para la integración de nuevas tecnologías a nuestro país, mediante la revisión del estado del arte.

A.7 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir los diferentes tipos de sistemas de almacenamiento de energía eléctrica más usados a nivel mundial.
- Analizar la matriz energética eléctrica del Ecuador.
- Justificar las tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica que se pueden utilizar en el Ecuador

CAPÍTULO 1

Revisión del estado del arte

Objetivo:

- Describir los diferentes tipos de sistemas de almacenamiento de energía eléctrica más usados a nivel mundial.

1.1 Definición de energía renovable

Las energías renovables son aquellas que se producen de forma continua y son inagotables a escala humana; se renuevan continuamente, a diferencia de los combustibles fósiles, de los que existen unas determinadas cantidades o reservas agotables en un plazo más o menos determinado. (Paish 2012)

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

1.2 Energía renovable

(Alzamora 2015) afirma que esta se puede clasificar como provenientes del sol (directa o indirectamente), o no solares (mareomotriz y geotérmica).

1.3 Energía no renovable (Brown Energy)

Se genera energía a partir de combustibles fósiles (carbón, gas natural o petróleo), y combustibles nucleares. Estas fuentes se encuentran en la naturaleza de manera limitada y su extinción supone un problema a largo plazo pues no pueden ser sustituidas. (Llive Guerrero 2019)

1.4 Energía Sostenible

La energía sostenible se puede definir como aquella energía capaz de satisfacer las necesidades presentes sin comprometer los recursos y capacidades de las futuras generaciones. (Morales et al. 2014)

1.5 ¿Por qué surgen los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica?

(Llive Guerrero 2019) afirma que analizar el nacimiento y la relevancia de las energías renovables puede ser un problema complejo ya no existe una única respuesta. Algunos factores clave en este ámbito pueden ser:

- a) Agotamiento de los combustibles fósiles
- b) Seguridad en el suministro eléctrico

- c) Aumento de la demanda energética mundial
- d) Cambio climático y Desarrollo sostenible

1.6 Sistemas de almacenamiento energía eléctrica

Los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica (EES) por sus siglas en inglés *electrical energy storage systems*; son aquellos que conservan la energía eléctrica cuando existe baja demanda, el coste de la generación eléctrica es bajo o cuando provienen de productores externos de energía renovable intermitentes para ser aprovechada cuando la demanda supera sus límites, dando apoyo a la generación convencional. (Vargas and Garcia 2018).

Para lo cual es necesario un proceso de conversión de energía mecánica, química, cinética y posteriormente para convertirla en energía eléctrica teniendo en cuenta las pérdidas que se producen en estos procesos.

Fox (2012) menciona que, los fósiles no solo generan electricidad, sino que constituyen excelentes reservas químicas de energía. La red del futuro deberá sustituir esa capacidad de acopio de otros medios. Por lo tanto, debemos estudiar los sistemas de almacenamiento que son muy importantes; porque nos permiten almacenar la energía durante los picos de producción a fin de suministrar esa energía a la red cuando no sople el viento, no corra el agua o no brille el sol.

1.7 Tipos de sistemas de almacenamiento de energía

En cuanto a los sistemas de almacenamiento podemos clasificar en 4 tipos:

1.7.1 Mecánicos:

- a) Almacenamiento hidráulico bombeado (PHS) *Pumped Hydro Storage*
- b) Almacenamiento de energía por aire comprimido (CAES) *Compressed Air Energy Storage*
- c) Volantes de inercia (FES) *Flywheel Energy Storage*

1.7.2 Electroquímicos:

- a) Batería de ácido sólido (Lead Acid Battery)
- b) Pilas de combustible (Fuel Cell)

1.7.3 Eléctricos:

- a) Supercondensador (SC) *Super-Capacitor*

1.5.4 Térmicos:

a) Almacenamiento de energía térmica (TES) *Thermal Energy Storage*

A continuación, se realiza una revisión bibliográfica de los sistemas de almacenamiento de energía más utilizados de todos los sectores; ya que es evidente que el almacenamiento por bombeo hidráulico es el más utilizado en todo el mundo, pero existen otras buenas opciones como son: el almacenamiento por aire comprimido, el almacenamiento térmico y el almacenamiento en baterías de litio. Estas son mejores opciones de conservación de energía, tanto por la capacidad y menor costo de almacenamiento. (Vasudevan et al. 2021)

La acumulación de energía en pequeñas proporciones se ha utilizado desde hace muchos años como plantas de reserva y de carga máxima. Hasta ahora solo 2 sistemas de almacenamiento consideradas adecuadas para realizarlas con fines comerciales a gran escala son el almacenamiento de energía por aire comprimido (CAES) y la energía hidroeléctrica bombeada (PHS). (Molina Sanchez, Pérez Sichacá, and Rivera Rodriguez 2017)

1.8 Mecánicos

Esta categoría aborda dos tipos básicos de almacenamiento de energía que resulta de la aplicación de fuerzas a sistemas. Uno de estos involucra cambios en la energía potencial y el otro involucra cambios en el movimiento de la masa y por ende de la energía cinética. (Ortiz 2017)

1.8.1 Almacenamiento hidráulico bombeado (Pumped Hydro Storage)

El almacenamiento de energía mediante el bombeo hidráulico es un sistema muy desarrollado y utilizado para producción de energía a gran escala. Para que funcione como un sistema de almacenamiento de energía se devuelve el agua a un embalse superior donde queda almacenada, el agua cae hacia abajo a lo largo de una serie de grandes tubos llamados conductos de presión. De esta forma, hace girar muchas rpm las hélices de unas turbinas. Estos aparatos alimentan con su energía mecánica a los generadores eléctricos los cuales producen electricidad. (Vargas and Garcia 2018)

Este sistema de almacenamiento es muy impredecible ya que depende siempre de la disposición del clima, por eso es recomendable siempre las reservas de almacenamiento de agua.

1.8.1.3 La central hidroeléctrica de bombeo.

Las centrales hidroeléctricas de bombeo son sistemas hidroeléctricos que combinan una central hidroeléctrica y una estación de bombeo. A continuación, se muestran las partes principales que tiene una central hidroeléctrica de bombeo:

- (1) Embalse inferior o río
- (2) Tubería forzada
- (3) Embalse superior
- (4) Presa
- (5) Galería de conducción
- (6) Turbinas
- (7) Generador
- (8) Chimeneas de equilibrio
- (9) Transformadores
- (10) Red eléctrica
- (11) Desagües

Una vez conocido las partes, se pasa a detallar el funcionamiento típico que tiene de una central hidroeléctrica de bombeo como lo muestra en la Figura 1.1

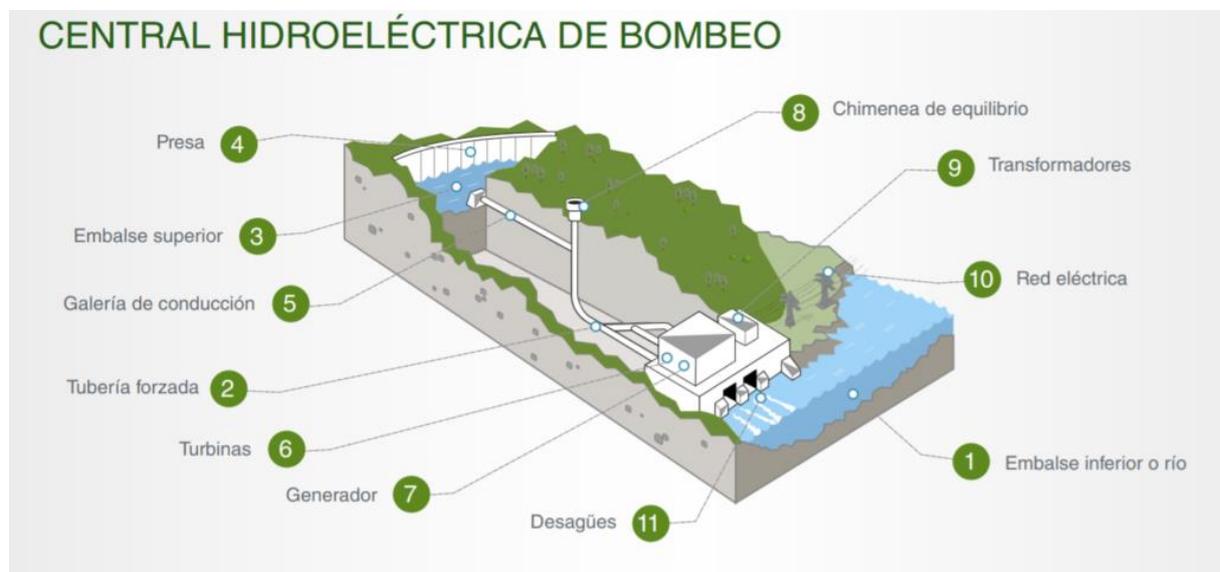


Fig. 1.1 Partes de una central hidroeléctrica de bombeo
Fuente: (IBERDROLA 2021)

1.8.1.2 Funcionamiento

Como podemos observar en la Figura 1.1 el agua que se acumula en los embalses (3), y se dirige por una tubería forzada (2), hacia el cuarto de máquinas. Para la regulación de las

presiones del agua entre las galerías de conducción anteriores (3), se construye en ocasiones una chimenea de equilibrio (8).(Roca 2017)

En la tubería forzada (2), el agua adquiere energía cinética (velocidad) que al chocar con las hélices de la turbina hidráulica (6), se convierte en energía mecánica rotatoria. Esta energía producida por la turbina es transferida a un generador de elevación (7) para la transformación a electricidad de media y alta tensión (9). Una vez elevada su tensión en los transformadores es enviada a la red general mediante líneas de transporte de alta tensión (10). El agua, una vez que ha generado la electricidad, circula por el canal de desagüe (11), hasta el embalse inferior (1), donde queda almacenada.(Roca 2017)

Cuando el consumo de energía es menor lo que es generalmente por las noches los fines de semana cuando la mayoría de las personas no trabajan, se aprovecha que la electricidad en esas horas tiene en el mercado una menor demanda, se utiliza la energía eléctrica para accionar una bomba hidráulica que eleva el agua desde el embalse inferior (1), hasta el embalse superior (4), a través de la tubería forzada (2), y de la galería de conducción (5). Esto lo encontramos en las grandes centrales hidroeléctricas del mundo.(Roca 2017)

El agua es elevada, generalmente por las propias turbinas de la central (6), funcionando como bombas accionadas por los generadores que actúan como motores. Una vez efectuada la operación de bombeo, el agua almacenada en el embalse superior (4), está en condiciones de repetir otra vez el ciclo de generación eléctrica.(Roca 2017)

1.8.2 Almacenamiento de energía por aire comprimido (Compressed Air Energy Storage)

El almacenamiento de energía en aire comprimido (CAES) ha sido ampliamente utilizado con éxito en diferentes instalaciones. Es un método que utiliza energía de bajo costo o energía disponible durante las horas de poca demanda, para comprimir aire en grandes cavernas subterráneas. Ejemplos concretos de plantas de CAES se encuentran en McIntosh (Alabama) y en Fráncfort (Alemania). (Escobar Mejia 2015)

La Figura 1.2 a continuación muestra un esquema de una planta típica CAES, en la que se puede observar sus partes y sistemas de funcionamiento de esta planta.

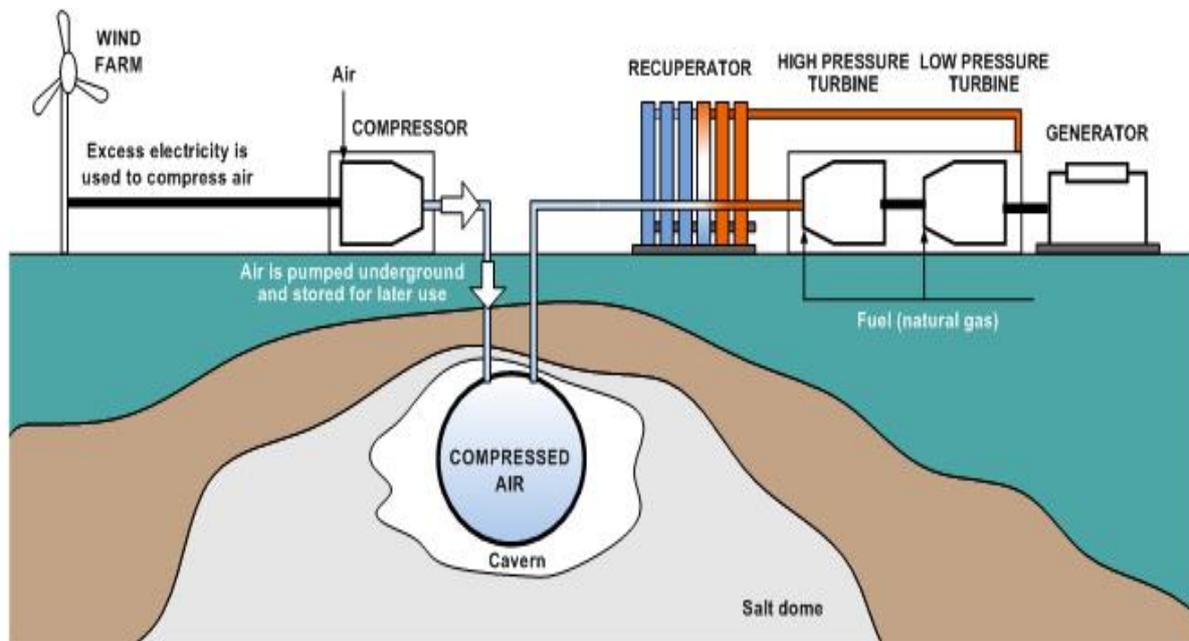


Fig. 1.2 Típica instalación de CAES
Fuente: (VOLIUM 2020)

Como podemos observar en la Figura 1.2 El aire extraído de las cavernas es calentado usando gas natural en una cámara de combustión. Este aire es empleado para accionar un generador. Si bien este proceso requiere ciclo combinado, el consumo de gas natural para calentar el aire comprimido es menor que si se usaran las centrales de gas convencionales para generar electricidad. (Del Corte Revuelta 2019).

Su principal desventaja es que es se deben construir o adecuar en donde las condiciones geológicas del terreno lo permitan.

Hasta el momento, solo hay 2 plantas CAES en el mundo: la planta de 290 MW que pertenece a EN Kraftwerke, Fráncfort, Alemania, construida en 1978, y la planta de 110 MW de AEC (Alabama Electric Corporation) en McIntosh, Alabama, Estados Unidos. (Del Corte Revuelta 2019)

Los CAES se pueden construir para que tengan escalas de pequeñas a grandes de potencia; duraciones de almacenamiento de cortas a largas con un tiempo de respuesta moderado y con un buen rendimiento de carga parcial.

1.8.2.1 Tipos de planta CAES.

Se define 4 tipos de sistemas de almacenamiento por aire comprimido que son: CAES convencional, CAES con inyección de aire (CAES-AI), CAES distribuida (D-CAES) y CAES adiabático (A-CAES).

- **CAES Convencional.**

Los sistemas CAES convencionales son muy similares a las turbinas de gas. La gran diferencia es que el sistema CAES convencional realiza la compresión y la expansión en dos procesos separados, realizándose en horas diferentes. (Muñoz Diez de la Cortina 2015)

Los CAES convencionales se refiere al establecimiento de un sistema con integración de diferentes componentes, dispositivos y procesos que interactúan como son:

- (1) Un tren de compresión
- (2) Unidad de motor generador
- (3) Turbina
- (4) Almacenamiento de aire comprimido.

A continuación, se puede observar una planta CAES Figura 1.3 con los distintos elementos que la componen.

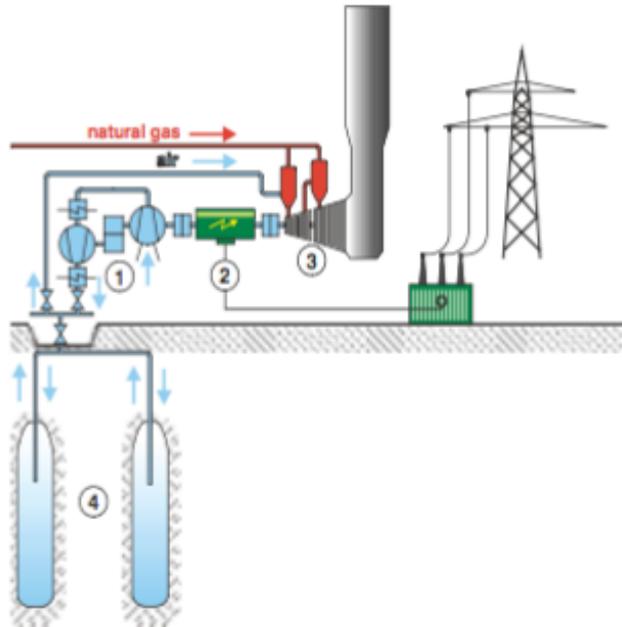


Fig. 1.3 Elementos principales planta CAES
Fuente: (Del Corte Revuelta 2019)

El funcionamiento básico de las plantas CAES, como podemos observar en la Figura 1.3. El sistema funciona mediante el almacenamiento de la energía en forma de aire comprimido en tanques (compresores) o cavidades subterráneas (4), y después este aire es liberado como una fuente de energía en diferentes etapas. Cuando el aire pasa por el tren de compresión (1), se genera calor. El aire comprimido se introduce en una cámara de combustión en la que se quema gas natural, para aumentar la temperatura del aire, con el objetivo de mejorar el rendimiento de la turbina (3), que permitirá la expansión del aire para transformarlo en energía

mediante el sistema motor-generador (2), que en ese momento actuará como generador(Del Corte Revuelta 2019).

- **CAES con inyección de aire (CAES-AI).**

El concepto se basa en la inyección del aire almacenado y precalentado directamente en la cámara de descarga del compresor en una turbina de gas, lo que proporciona el aumento de potencia de la turbina de gas. En comparación con los sistemas CAES convencionales, el diseño propuesto puede aportar beneficios para eliminar las limitaciones de tiempo de conmutación al desacoplar el tren de compresión y turbo expansor, mejorar la eficiencia energética, etc. Tal tecnología CAES a gran escala mejorada con el diseño de optimización del sistema de turbina de gas es, actualmente, todavía bajo investigación y desarrollo.(Wang et al. 2017)

- **CAES distribuida (D-CAES).**

"Las plantas D-CAES consisten en el aprovechamiento del calor desprendido en la compresión para sistemas de calefacción." ("Análisis, almacenamiento de energía de aire comprimido - 1Library.Co") Lo que hace que se mejore la eficiencia térmica general del sistema convencional CAES. Esta nueva configuración, llamada CAES distribuida (DCAES), se realiza mediante la distribución de estaciones de compresión de aire cerca de las cargas de calor, como las instalaciones de calefacción de distrito para poder transportar el calor con facilidad. La expansión funciona del mismo modo que un sistema CAES convencional.(Del Corte Revuelta 2019). Cabe mencionar que este tipo de sistemas se encuentran en fase de desarrollo e investigación.

- **CAES adiabático (A-CAES).**

En este sistema el aire se comprime adiabáticamente y se bombea a un depósito de almacenamiento. El sistema A-CAES integra un subsistema de almacenamiento de energía térmica, la energía almacenada en el aire comprimido se convierte en la salida de potencia eléctrica sin un proceso de combustión involucrado, eliminando la producción de CO_2 . El componente clave de dicho sistema A-CAES son los intercambiadores de calor. Estos intercambiadores de calor absorben el calor del aire comprimido a alta temperatura y ahorran la energía térmica para recalentar el aire antes de la expansión. La tecnología A-CAES está actualmente en desarrollo y construyendo plantas de demostración hacia la comercialización con diferentes escalas de sistema. La tecnología para A-CAES a pequeña escala está relativamente más desarrollada que la utilizada para sistemas a gran escala. (Artinostic, Chen, and Shasha 2017)

1.8.3 Volantes de inercia (FESS)

El volante de inercia (FES) es un elemento capaz de almacenar la energía cinética mediante una rotación, la cual será liberada en el momento que sea necesario. (Alzola and Fernández 2018)

La siguiente Figura 1.4 nos muestra la estructura básica que debe tener un volante de inercia para el correcto funcionamiento, sin tomar en cuenta el tipo de componentes que se utilice o a la velocidad que funcionen.

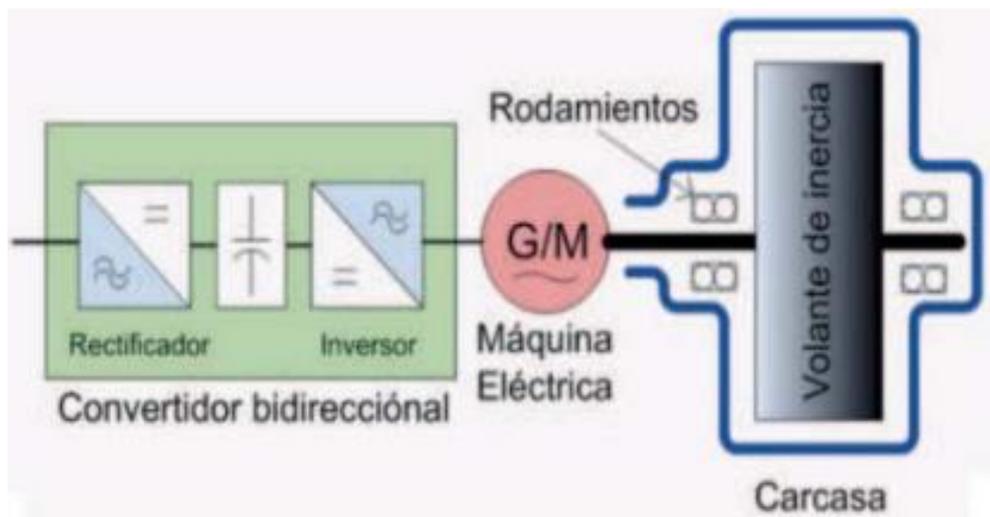


Fig. 1.4 Esquema de un volante de energía
Fuente:(García 2017)

En la Figura 1.4 se observa que los volantes se cargan y descargan gracias a la acción de una máquina eléctrica que actúa como motor o generador y utilizando la energía proporcionada por la red eléctrica se provoca el movimiento del rotor del volante hasta alcanzar su velocidad nominal (proceso de carga). Después la energía mecánica almacenada se transforma en el momento de su utilización a energía eléctrica mediante el generador, disminuyendo en el proceso la velocidad del rotor del volante hasta su valor mínimo de diseño. Acto seguido se transforma corriente alterna mediante un inversor y un sistema de control se encargará de controlar los valores de utilización. Además, existe un máximo de energía que podemos almacenar, la cual está condicionada a la resistencia y la tracción del material con el que esté construido el volante. (Díez Olleros 2018)

1.8.3.1 Clasificación de los volantes de inercia con base a su velocidad:

Por su velocidad de inercia base se los clasifica en: Volante de inercia a bajas velocidades, rango de velocidad $< 6 \cdot 10^3$ (6000) rpm y Volantes de inercia a altas velocidades, rango de velocidad 10^4 - 10^5 (10000-100000) rpm.

- **Volante de inercia a bajas velocidades, rango de velocidad $< 6 \cdot 10^3$ (6000) rpm.**

Su principal uso es en aplicaciones de calidad de energía (regulación de frecuencia, sistemas híbridos y sistemas de alimentación ininterrumpida).

Un sistema de esta categoría lo encontramos en España, en la isla de La Palma cuenta con un volante de inercia que gira a 3600 rpm, capaz de absorber un máximo de 1.5 MW durante un tiempo de 12 segundos y aportar 18MWs a la red. El objetivo de este volante de inercia en España es aportar con energía para estabilizar la frecuencia, así como también es capaz de mantener un nivel de tensión determinado.(Remache 2020)

- **Volantes de inercia a altas velocidades, rango de velocidad 10^4 - 10^5 (10000-100000) rpm.**

Su principal uso es en aplicaciones de la industria del transporte (vehículos híbridos y catenarias de trenes) e industria aeroespacial (satélites y catapultas en portaviones). Un ejemplo de este tipo de sistema se lo encuentra en un automóvil Porsche 911 GT3 R Hybrid, que cuenta con un volante de marca Williams Hybrid Power, capaz de alcanzar 40000 rpm y desarrollar una potencia de 120kW. (Hernandez 2016)

1.8.3.2 Clasificación de volantes de inercia con base a su composición:

Por su composición a los volantes de inercia se los clasifica en: rotor de composite avanzado y rotor de acero.

- **Rotor de composite avanzado, como grafito o fibra de carbono.**

Estos son los más avanzados y tienen un precio mucho mayor. Estos materiales son muy resistentes a esfuerzos mecánicos y poseen baja densidad, lo que los hace idóneos para esta función. El ejemplo más representativo es el Módulo G2, volante de inercia diseñado por la NASA, es un sistema de 60.000 RPM, 525 W-hr, 1 kW; consta de un rotor compuesto de una llanta de fibra de carbono multicapa con un buje de titanio en el que se montan los otros componentes y rodamientos magnéticos, con una eficiencia del 93%.(Jansen and Dever 2014)

- **Rotor de acero.**

Este modelo tradicional es utilizado en bajas velocidades con grandes diámetros, bajas potencias y densidad de energía, además de volantes para altas prestaciones, por lo que es muy versátil. Se debe trabajar con aceros poco densos y posee el riesgo de rotura (dispersión de fragmentos).(Hernandez 2016).

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

En conclusión, en el futuro el volante de inercia puede ser un método muy factible de almacenamiento, ya que se está investigando nuevos materiales y nuevas formas de producción y mecanizado para que el volante tenga una eficiencia mayor con un coste menor.

1.9 Electroquímicos

En esta categoría almacenamiento de energía convierte energía eléctrica en energía química para ser almacenada, generalmente mediante el uso de baterías o condensadores electroquímicos.(Tiemblo, Gregorio, and Garcia 2020)

1.9.1 Batería de ácido sólido (Lead Acid battery)

El principio de funcionamiento de una batería está basado básicamente en un proceso reversible llamado reducción-oxidación, donde uno de los componentes se oxida (pierde electrones) y el otro componente se reduce (gana electrones). Por lo tanto, se trata de un proceso en el que los componentes no se consumen, sino que únicamente cambian su estado de oxidación; por otro lado, dichos componentes pueden retornar a su estado original en las circunstancias adecuadas. Estas circunstancias son el cierre del circuito externo durante el proceso de descarga y la aplicación de una corriente externa durante el proceso de carga.(Bertran 2017).

Los ciclos de carga/descarga definirán la vida útil de las baterías. A medida que una batería es descargada y cargada, su capacidad sufre alteraciones, de manera que, tras un cierto número de ciclos, la batería pierde calidad y no consigue completar con éxito las reacciones químicas. (“7. Baterías para Almacenamiento de Energía”) La carga en exceso puede también ser perjudicial para su vida útil.(García 2017)

Las baterías también sufren un efecto conocido como “autodescarga” cuando no están en usos, ya que pesar de que no se utilicen, la energía almacenada en su interior irá disminuyendo progresivamente con el paso del tiempo de forma espontánea. (García and Hernaiz 2010)

1.9.2 Plomo-Ácido

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

fija, sino que depende del mínimo estado de carga admisible por cada batería. (Rojas, Echeverry, and Sierra 2018)

Poseen un electrodo de plomo y otro de peróxido de plomo; su electrolito es ácido sulfúrico disuelto en agua. Cuando la batería se encuentra descargada, la densidad del electrolito disminuye y aumenta cuando está cargada. (Rojas et al. 2018)

1.9.2.1 Principales ventajas y desventajas son:

Ventajas

- Aportan una tensión elevada ($V_{sal/celda} = 2.1V$)
- Son capaces de soportar elevadas corrientes de descarga y aplicar una alta potencia de descarga.
- Son muy baratas y fáciles de encontrar.
- Altamente reciclables.
- Tecnología madura.
- Rendimiento del 80%.

Desventajas

- Baja energía específica (10-40Wh/kg)
- Ciclabilidad muy baja ante descargas muy profundas (400 – 800 ciclos). Con ciclos de descarga menos profundos la ciclabilidad aumenta hasta 4500 ciclos.
- Ocupan un volumen muy amplio y su peso es elevado.
- Existe la posibilidad de explosión debido al desprendimiento de hidrógeno.
- Contaminan mucho debido a los compuestos de plomo, antimonio y arsénico.
- Algunas requieren mantenimiento específico.

1.9.2.2 Inconveniente a mayores:

La sulfatación es el resultado de la descarga de la batería de forma profunda continuadas veces por debajo del mínimo especificado, también una carga incorrecta, o la inactividad de esta. Se producen cristales que disminuyen la superficie activa del electrodo, y la capacidad de la batería disminuye. Este fenómeno puede paliarse con descargas con altas corrientes para disolver los cristales. (Manwell and Jon 2013)

Las baterías de plomo-ácido son muy utilizadas en sistemas fotovoltaicos. Además, tienen una vital importancia actualmente en aplicaciones en automóviles de motor de combustión para el arranque del vehículo. (Rojas et al. 2018)

Acercas 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 aun atractivas a todos los niveles de aplicación. (Manwell and Jon 2013)

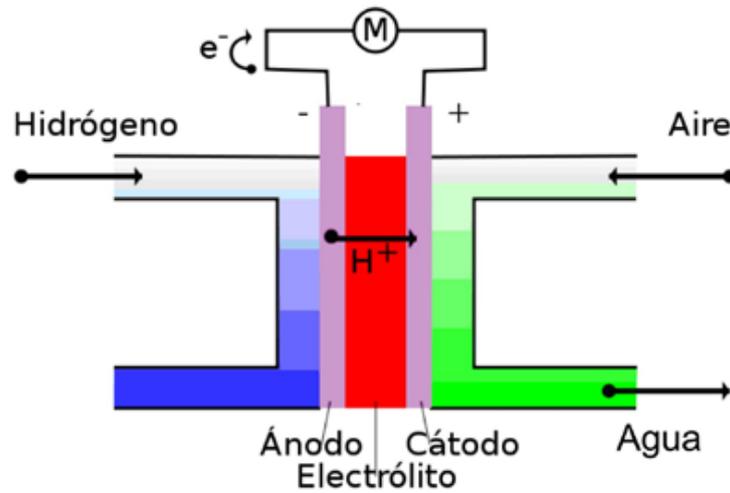
1.9.3 Pilas de combustible (Fuel Cell)

Una pila de combustible, también denominada célula o celda de combustible es un dispositivo electroquímico de conversión de energía similar a una batería, pero que se diferencia de esta última en que está diseñada para permitir la reposición continua de los reactivos gastados, Esto significa que genera energía a partir de una fuente externa de combustible y de oxígeno, a diferencia de la capacidad limitada de almacenamiento de energía que de una batería. (Asensio et al. 2011)

Los reactivos que se utilizan normalmente son el hidrogeno en el ánodo y el oxígeno en el cátodo, en el caso de una pila de hidrogeno, mientras que, en las baterías los reactivos consumidos son sólidos y cuando se agotan se recargan mediante energía eléctrica. Los productos que resultan de las reacciones de una pila de combustible son calor, electricidad y agua. También existen razones para implantar el hidrógeno como nuevo vector energético: evitar la contaminación que produce la quema de los combustibles fósiles y el carácter inagotable del hidrógeno (aunque este no se encuentre en estado puro en la Tierra). (Arribas et al. 2014)

El mecanismo de funcionamiento de una pila de combustible se basa en la oxidación del hidrógeno en el ánodo y la reducción del oxígeno en el cátodo, creando de esta manera una diferencia de potencial entre ambos electrodos (justo lo contrario a la reacción electrolítica). Esta tensión, se aplica a una carga conectada a la salida de la pila de combustible, generada gracias la transferencia de cargas a través de un electrolito aislante por el cual se presenta una fluencia de iones. A diferencia de las baterías, las cuales necesitan llenar su capacidad gracias a una fuente de tensión externa, las pilas de combustible transforman de forma directa el combustible a energía eléctrica. (Pérez Martínez et al. 2012)

A continuación, en la Figura 1.5 el esquema muestra cómo funciona la pila de combustible.



| | | |
|--------------------|--|---|
| Electrodo negativo | 2H_2 | $\rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$ |
| Electrodo positivo | $\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$ | $\rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ |
| Reacción global | $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ | $\rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ |

Fig. 1.5 Esquema funcionamiento de una pila de combustible
Fuente: (García 2017)

Dependiendo del tipo pila se puede emplear como combustible metano o monóxido de carbono entre otros, como alternativa al hidrógeno que es actualmente muy costoso de producir y peligroso si se trata de forma inadecuada, pero dichos combustibles necesitan purificación para el correcto funcionamiento de la pila. Sin embargo, el mayor rendimiento se alcanzará con el hidrógeno, además de que lo único que genera este combustible será agua. (Peña et al. 2017)

1.9.3.1 Clasificación de las pilas de combustible según el electrolito que se utilice:

TABLA 1.1
Características principales de las pilas de combustible

| Tipo e pilas de combustible | Tipo de electrolito | Rendimiento | Temperatura de operación | Ventajas | Desventajas | Aplicaciones |
|---|---|-------------|--------------------------|--|---|--|
| Pilas de membrana polimérica (PEMFC) | Polímero sólido | 60 % | 70-80 °C | Baja corrosión del electrolito y bajo mantenimiento de la pila. Rápido arranque de operación. Acepta hidrocarburos ligeros reformados. | Catalizaciones costosas y sensibles a impurezas. | Suministro energético para vehículos, maquinas portátiles y generación estacionaria. |
| Pilas de combustibles alcalinas (PAFC) | Solución acuosa de hidróxido de potasio. | 60 % | 90-100 °C | Reacción catódica rápida y alta eficiencia | Alta sensibilidad a las impurezas. Necesita emplear hidrógeno puro. | Aplicaciones militares y espaciales. |
| Pilas de ácido fosfórico (PAFC) | Ácido fosfórico líquido | 50-80 % | 175-200 °C | Alta eficiencia en cogeneración de electricidad y calor. Acepta hidrógeno impuro. | Baja corriente y potencia. Gran peso y volumen | Aplicaciones de generación estacionaria. Aparatos portátiles. |
| Pilas de carbonato fundido (MCFC) | Solución líquida de litio, sodio y potasio. | 60-90 % | 600-1000 °C | Alta eficiencia debido a la alta temperatura. Catalizadores relativamente baratos | Baja vida útil por la corrosión a alta temperatura. Acepta hidrocarburos reformados, pero no tolera el azufre | Generación estacionaria |

| | | | | | | |
|-------------------------------------|---|---------|-------------|---|---|-------------------------|
| Pilas de óxido sólido (SOFC) | Óxido de zirconio sólido con adiciones de itrio sólido. | 60-90 % | 600-1000 °C | Debido a la alta temperatura, tiene alta eficiencia y los catalizadores relativamente baratos | Baja vida útil por la corrosión a alta temperatura. Acepta hidrocarburos reformados, pero no tolera el azufre | Generación estacionaria |
|-------------------------------------|---|---------|-------------|---|---|-------------------------|

Fuente:(Asensio et al. 2011)

Las pilas de combustible ofrecen por lo general una alta densidad de energía, flexibilidad en el combustible que se utiliza y son fáciles de emplazar. Además, aunque en algunas de ellas la respuesta en el arranque sea lenta, tiene una rápida respuesta a las variaciones de carga, ya que simplemente se necesita añadir más combustible a la misma. (Ruiz-Morales et al. 2015)

1.9.4 Baterías de litio

La batería de iones de litio, también conocida como batería Li-Ion, es un dispositivo de almacenamiento de energía eléctrica que emplea una sal de litio como electrolito que suministra los iones necesarios para la reacción electroquímica reversible que tiene lugar entre el cátodo y el ánodo.(Manrique 2016)

Los esfuerzos para el desarrollar las baterías de litio recargables han concluido que la capacidad de recargas reduce la estabilidad térmica y causan reacciones internas, especialmente durante la carga. Las baterías de litio a pesar de tener densidad de energía menor que la del metal, ofrecen mayor capacidad de recarga y son más seguras.(Tiemble et al. 2020)

1.9.4.1 Tipos de baterías de litio

Existen dos tipos de baterías de litio que son: no recargables y recargables.

- **No Recargables**

Las baterías de litio contienen litio metálico y no son recargables. Ejemplos de ellas son las de tipo botón que se utilizan en calculadoras manuales, relojes y pequeños dispositivos médicos. Se las denomina baterías de litio primarias y brindan mayor energía útil por unidad de peso a diferencia de las baterías de ión-litio a las que se denominan secundarias. (Fonseca 2015)

- **Recargables**

Las baterías de ión-litio usan compuestos de litio, que resultan más estables, no se oxidan espontáneamente y son recargables eléctricamente. Las baterías de Li-ion tienen un costo de mantenimiento muy bajo, ventaja que ningún otro proceso químico puede reclamar. No hay efecto memoria y no se requieren ciclos para prolongar la vida de la batería. Además de una elevada densidad de energía y escaso peso. En cuanto a aspectos negativos, la batería de Li-ion es frágil y requiere un circuito de protección para mantener una operación segura. La corriente de carga es moderada y la carga se debe hacer conforme a normas estrictas. Además, la batería de Li-ion envejece, se use o no. (Caballero 2016)

Según (Manrique 2016) existen varias configuraciones y tipos de baterías de ión-litio, que no tienen un diseño y tamaño común, sino que se fabrican específicamente para un determinado dispositivo electrónico. Se podría clasificar a las baterías de ión-litio de acuerdo con la composición química y el empaquetado de la batería.

1.10 Eléctricos

En esta categoría hay mecanismos generales por el cual la energía eléctrica puede ser almacenada: uno involucra capacitores y la otra forma involucra las relaciones entre fenómenos eléctricos y magnéticos. (Cueva, Lucero, and Guzman 2018)

1.10.1 Supercondensador (SuperCapacitor)

Los Supercondensador (SuperCapacitor) o ultra condensadores son componentes electrónicos pasivos que permiten el almacenamiento de energía en pequeños periodos de tiempo. (Ye, Sharma, et al. 2015)

El principio de funcionamiento en el que se basan los supercondensadores 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. (Zhang and Pan 2015)

La siguiente Figura 1.6 es una representación de varios capacitores que se conectan entre sí, para sumar las capacitancias y obtener un mayor rango de almacenamiento de energía



Fig. 1.6 Grupo de SuperCapacitor
Fuente: (MAXWELL T 2019)

Su funcionamiento es idéntico que el de los condensadores tradicionales, el almacenamiento eléctrico gracias a campos eléctricos, se acumulan iones y se produce una transferencia de masa. Pero mientras los condensadores tienen una capacitancia del orden de microfaradios mientras que los ultra condensadores alcanzan magnitudes de 5000 faradios, como se puede observar en la Figura 1.6 que es un grupo de supercapacitores que, por su tamaño y peso reducido, se están adaptando para almacenar electricidad en vehículos eléctricos. (Ye, Liu, et al. 2015)

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. (Shao et al. 2018)

Características principales de los supercondensadores:

- a) Densidad de energía: ~ 20-100 Wh/Kg
- b) Densidad de potencia: ~ 20-200 W/kg
- c) Rango de energía: para sistemas de hasta 100MWh
- d) Rango de potencia: ~ 1kW-30MW
- e) Tiempos de carga y descarga: ~ horas
- f) Número de ciclos de carga y descarga: 1000 – 3000
- g) Rendimiento: 75% – 99% según tecnologías
- h) Autodescarga: 0 – 20 % al mes según tecnologías
- i) Precios bajos para Pb-ácido, medios para Ni-Cd y caros para Li-ión
- j) Según tipo puede poseer elementos tóxicos

La capacitancia del supercondensador, al igual que de un condensador, es proporcional a la superficie de los electrodos y a la permisividad dieléctrica del medio e inversamente proporcional a la distancia entre los electrodos.(Bohlen, Kowal, and Sauer 2017)

Las propiedades del ultra condensador están basadas en el circuito equivalente que se muestra a continuación en la Figura1.7.

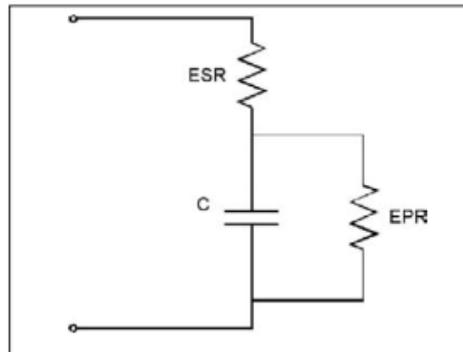


Fig. 1.7 Circuito equivalente de un supercondensador
Fuente:(Zhang and Pan 2015)

Como se observa en la Figura 1.7, existe una resistencia equivalente en serie (ESR), la cual representa las pérdidas del dispositivo cuando conduce, y una resistencia equivalente en paralelo (EPR), que representa las perdidas por corrientes de fuga. Ambas son muy pequeñas. Siendo esto así, se alcanzan rendimientos por encima del 95%.(Lin, Taberna, and Simon 2017)

1.11 Térmicos

1.11.1 Almacenamiento de energía térmica (Thermal Energy Storage)

Los sistemas de almacenamiento térmico tienen el potencial de aumentar el uso efectivo de la energía térmica y de facilitar el control de la generación termica a gran magnitud. Suelen ser especialmente útiles para la corrección de la discordancia entre demanda y producción de energía. (Lizana et al. 2017)

1.11.1.1 Clasificación del almacenamiento térmico:

El almacenamiento térmico se lo ha clasificado en: almacenamiento de calor sensible, almacenamiento de calor latente y en almacenamiento subterráneo de energía térmica.

- **Almacenamiento de calor sensible**

Consiste en almacenar la energía que de el material (usado sales fundidas) libera cuando su temperatura se reduce, al experimentar un cambio en su energía interna. Además de la densidad y del calor específico, existen otras propiedades que influyen en el almacenamiento de calor sensible, como son la temperatura de operación, la conductividad térmica, difusión, presión de vapor y por último es muy importante tener en cuenta los costes. (Muños 2017)

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

$$Q = \rho C_p V \Delta T \quad (1)$$

Siendo ρ , la densidad del material de almacenamiento, C_p el calor específico, V el volumen de material de almacenamiento utilizado y ΔT , el rango de temperatura. (Oliver, Neila, and García 2011)

Una extensa variedad de fluidos han sido probados como materiales de almacenamiento, agua, aceites y sodio; destacando entre ellos, las sales fundidas. Su elección atiende a que son líquidas a presión atmosférica, presentan una excelente relación entre la capacidad de almacenamiento y el precio, sus temperaturas de operación son compatibles con las altas presiones y temperaturas en las turbinas de vapor, y no son inflamables ni tóxicas (a diferencia de los aceites sintéticos). (Guacaneme, Velasco, and Trujillo 2014)

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. (Ramirez et al. 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. (Segarra, Fernandez, and Berrenche 2018)

Este método posee una densidad de energía mayor que el calor sensible. Otras ventajas destacables son: como la temperatura es 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. (Mírez 2016)

Algunos de los posibles materiales a utilizar son denominados materiales de cambio de fase, los cuales necesitan gran cantidad de energía empleada con el fin de cambio de estado, manteniendo la temperatura en este punto constante. Las sales fundidas son uno de los ejemplos más avanzados de esto, utilizadas como sistema de almacenamiento de energía. (Guacaneme et al. 2014)

Como principal aplicación tenemos la calefacción de viviendas, y no se aplica en producción de energía debido a que no existe un material que cumpla todos los requisitos para el proceso. (Oliver, Neila, and García-Santos 2012)

- **Almacenamiento subterráneo de energía térmica.**

Sus siglas en inglés UTES (Underground Thermal Energy Storage), es una forma de almacenamiento energético, que ofrece posibilidades de ahorro energético y sinergia con la producción de fuentes de energía renovables. (Sánchez and Pineda 2020)

Los anteriores tipos de almacenamiento se encontraban en la superficie y podían incluso transportarse. Sin embargo, es posible almacenar energía térmica de forma subterránea (frío o calor), debido a la alta capacidad calorífica del subsuelo y su buen aislamiento. Nos permite almacenar la energía durante largos periodos de tiempo, alcanzando algunos meses. (Segarra et al. 2018)

Se puede destacar el almacenamiento térmico, ya que ha demostrado su capacidad de almacenar grandes cantidades de energía a un coste razonable, mejorando la eficiencia del sistema y la gestionabilidad de la energía.

1.13 Comparación de sistemas de almacenamiento eléctrico

En un PHS, el exceso de energía generado durante los períodos de baja demanda y mayor producción se utiliza para bombear agua a un depósito ubicado a mayor altura, para almacenarla como energía potencial. Los PHS son capaces de cubrir el déficit energético existente (capacidad de reacción rápida) según la cantidad de energía almacenada. (Burga and Dueñas 2020)

El principal problema para la implementación de un PHS es que requiere generalmente de dos depósitos ubicados en cotas diferentes (aprox. 100 m) lo que acarrea un alto coste de capital. Otro factor para tener en cuenta es el impacto ambiental causado durante la construcción de la obra y la operación en los alrededores de esta. A pesar de los altos costos de construcción involucrados, los costos de operación y mantenimiento son bajos, los PHS tienen la capacidad de estabilizar la red eléctrica debido a la rápida capacidad de respuesta a los cambios repentinos de carga contrario a la respuesta que presentan las centrales térmicas. (Marín 2017)

Existen dos formas de acumular energía térmica, dependiendo de si se utiliza el calor sensible o el calor latente. Los TES basados en calor sensible, utilizan un aceite sintético o sales fundidas que almacenan energía en forma de calor, el cual es colectado por las centrales eléctricas termo-solares, para producir vapor de agua a fin de accionar un sistema turbo-alternador, y de esta manera permitir la entrega de potencia de forma suave durante períodos nublados del día y adicionalmente, ampliar la producción de energía por espacio de 1 a 10 horas, después de la puesta de sol, aumentando de esta forma la capacidad de generación en momentos de demanda pico.(Cabeza et al. 2019)

En conclusión, los TES tienen un buen sistema de almacenamiento que puede ampliar su producción cuando la demanda sea máxima, pero al contrario de los PHS no tienen alta capacidad de respuesta debido a los repentinos cambios que pueda tener la red eléctrica.

Al contrario de los CAES utilizan la energía comprimida asociada al aire presurizado contenido en depósitos subterráneos, consistente en cavidades naturales o antiguas minas o en acuíferos porosos o en depósitos construidos por el hombre. El almacenamiento se realiza comprimiendo el aire durante horas de baja demanda de energía eléctrica. Aunque este proceso requiere ciclo combinado, el consumo de gas natural para calentar el aire comprimido es menor que cuando se genera electricidad con sistemas de generación de gas convencionales. (Marín 2017)

Tienen la ventaja de poder utilizarse con sistemas a gran escala y poseer períodos de almacenamiento largos debido al hecho de que las pérdidas son muy pequeñas. Una instalación típica de CAES se puede utilizar para almacenar energía durante más de un año. Proporciona tiempos de arranque rápidos (9 minutos para un arranque de emergencia, y aproximadamente 12 minutos bajo condiciones normales), en comparación con la turbina de combustión convencional, la cual en horas pico, puede requerir 20-30 minutos para un inicio normal. (Lladó 2015)

Su principal desventaja es que se deben construir o adecuar en donde las condiciones geológicas del terreno lo permitan y sus altos costos de inversión no permiten que sean una solución para implementación a pequeña escala.

Mientras que los FES almacenan energía mediante la aceleración de un rotor (volante) a una velocidad muy alta y la energía se mantiene en el sistema como energía de rotación. Los sistemas de volantes de inercia avanzados tienen rotores hechos de fibra de carbono de alta resistencia, suspendido por los campos magnéticos. La velocidad de giro del volante va de 20.000 a más de 100.000 rpm en recintos al vacío. Estos volantes pueden alcanzar la velocidad máxima en cuestión de minutos, mucho más rápido que algunas otras formas de

almacenamiento de energía. La eficiencia de estos dispositivos puede alcanzar al 90%. Se trata de sistemas de reacción rápida capaces de almacenar y liberar mucha energía rápidamente. (Ramos, Miranda, and Serrudo 2017)

Las baterías utilizadas en micro redes son las llamadas secundarias que permiten recargarse a partir de energía eléctrica revirtiendo el proceso electroquímico. El principio de funcionamiento de una batería es la reacción electroquímica entre dos electrodos separados por un electrolito, las reacciones químicas en los componentes producen una corriente de iones en el electrolito que a su vez producen una corriente eléctrica en los electrodos. La tecnología de plomo-ácido es la más madura con más de un siglo de desarrollo. Sus desventajas son la limitación en el número de ciclos de carga y descarga (alrededor de 1000), la contaminación debida al electrolito, y la densidad de energía que se traduce en peso y tamaño por lo que no son recomendables para sistemas que requieran movilidad o portabilidad.(Peña Alzola and Sebastian Fernández 2018)

Los condensadores electroquímicos de doble capa o supercondensadores tienen características de condensadores y de baterías, excepto que su funcionamiento no depende de una reacción electroquímica, por lo que número de ciclos de carga y descarga es muy superior que en las baterías. El tiempo de vida es mucho mayor que el de condensadores convencionales alcanzando más de 10 años con auto descargas de 5% por día, es decir pueden utilizarse en aplicaciones rápidas.(Mendoza, Solano, and Correa 2020)

Los supercondensadores reaccionan a cargas y descargas muy rápidas y permiten descargas y sobrecargas profundas con una eficiencia energética de hasta el 98% debido a que no existe desgaste o calentamiento de los materiales. El objetivo de los supercondensadores en la Microred es la mejora de la calidad de potencia, su gran respuesta en potencia, pero por cortos periodos de tiempo lo hace especial para trabajar en conjunto con baterías o sistemas de almacenamiento con capacidad de energía.(Rodríguez 2020)

1.14 Tabla comparativa de los sistemas de almacenamiento de energía

TABLA 1.2
Clasificación y comparación de varios sistemas de almacenamiento de energía.

| Medio de almacenamiento energético | Capacidad | Tipo | Capacidad (MW) | Eficiencia (%) | Costo(\$/kW) | Costo(\$/kWh) | Tiempo de respuesta | Tiempo de vida(años) |
|------------------------------------|---------------|--------------------------|----------------|----------------|--------------|---------------|---------------------|----------------------|
| MECÁNICO | Alta energía | PHS | 100-5000 | 75-85 | 600-2000 | 5-100 | ≤ 15 min | 40-60 |
| | Alta energía | CAES | 3-400 | 50-89 | 400-2000 | 2-100 | ≤ 10 min | 20-60 |
| | Alta potencia | FES | 0.25 | 93-95 | 350 | 5000 | ≤ 10 ms | 12-16 |
| ELECTROMECAÁNICO | Alta energía | BATERIAS DE ÁCIDO SÓLIDO | 0-40 | 70-90 | 300 | 400 | ms | 5-15 |
| ELÉCTRICO | Alta potencia | SC | 0.3 | 90-95 | 300 | 20000 | ≤ 10 ms | >20 |
| TÉRMICO | Alta energía | TES | 0-300 | 30-60 | 200-300 | 3-50 | ≤ 18 min | 5-40 |

Fuente:(Vasudevan et al. 2021)

CAPÍTULO 2

Análisis de la matriz energética del Ecuador

2.1 Introducción

En el siguiente capítulo se tiene como finalidad dar a conocer como está constituido el sector eléctrico ecuatoriano, analizando los sistemas de generación eléctrica que existen en el Ecuador y como ha ido creciendo en estos últimos años, todos los cambios, avances de importancia que sucedieron, que ayudaron al crecimiento y mejoramiento de este. Así también, se hace la comparación de los sistemas de generación de energía más apropiados para la utilización en el Ecuador.

2.2 Metodología

Para desarrollar el siguiente análisis acorde con lo establecido en el segundo objetivo específico y tener los resultados esperados, se ha seguido la siguiente metodología en la cual constan los pasos descritos a continuación:

- La metodología del estudio consiste primero en analizar los documentos nacionales oficiales sobre la matriz energética de Ecuador. Para ello se utilizarán los datos de la Agencia de regulación y control de energía y recursos naturales no renovables (ARCONEL) y las estadísticas del Sector Eléctrico ecuatoriano.
- El segundo momento comprende en una revisión de literatura y estado del arte en artículos académicos, reportes de instituciones, libros y publicaciones de revistas académicas que nos proporcionan las principales instituciones públicas que trabajan constantemente para el desarrollo del sector eléctrico ecuatoriano tomando en cuenta los balances de energía eléctrica, para tener una idea de cómo está constituido el sector eléctrico en el Ecuador.

2.3 Matriz energética

La energía es un elemento fundamental en el desarrollo y crecimiento de la economía mundial. Sin embargo, no es la energía en sí misma la que tiene valor para las personas sino los servicios que brinda. Los servicios energéticos cubren una necesidad amplia y diversa: iluminación, confort (calefacción, aire acondicionado), refrigeración, transporte,

comunicaciones, tecnologías de información, producción de bienes y servicios, entre otros. La economía requiere energía para su funcionamiento y la tendencia mundial muestra un aumento de la demanda energía a medida que la economía crece.(Arconel 2021)

La matriz energética expresa el total de energía demandada y utilizada. La energía primaria comprende las energías encontradas en la naturaleza y que no han pasado por ningún proceso humano de conversión; es decir los recursos naturales disponibles (energía hidráulica, eólica, solar) y los combustibles crudos (petróleo, carbón, biomasa). Por otro lado, la energía secundaria es aquella que resulta de la transformación o conversión de las fuentes de energía primaria (ejem. petróleo a gasolina, hidráulica a electricidad).(Arconel 2021)

2.3.1 Estadísticas del sector eléctrico

Desde el 16 de enero del 2015 está en vigencia la Ley Orgánica de Servicio Público de Energía Eléctrica, que en el artículo 15 Atribuciones y deberes de la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (Arconel), numeral 9, indica: *“Implementar, operar y mantener el sistema único de información estadística del sector eléctrico”*, en cumplimiento de este marco legal la Coordinación Nacional de Regulación del Sector Eléctrico a través de la Unidad de Información Estadística y Geográfica tiene las funciones de gestionar, actualizar validar y procesar la información estadística y geográfica de los agentes del sector eléctrico, propendiendo al libre acceso de información completa, oportuna y de calidad de las actividades de generación, transmisión, distribución y alumbrado público general(ARC 2021)

2.3.2 Producción neta de energía

La energía neta total producida por las centrales consideradas en las transacciones en bloque en el 2020, fue de 26.979,96 GWh, con una participación del 89.58% de la producción hidroeléctrica, seguido de fuente termoeléctrica con el 8%, una participación del 1.49% de energía proveniente de generación no convencional y el 0.93% de importaciones internacionales de electricidad.(ARC 2021)

La Tabla 2.1 siguiente nos detalla la generación por tipo de producción (GWh) que se produjo en el 2020.

TABLA 2.1
Generación por tipo de producción (GWh), 2020

| TIPO DE PRODUCCIÓN | CONVENCIONAL | | NO CONVENCIONAL | | TIE | | TOTAL(GWH) | |
|------------------------------|--------------|------|-----------------|------|-------|------|------------|-------|
| | GWh | % | GWh | % | GWh | % | GWh | % |
| HIDROELÉCTRICO | 21882 | 81,1 | 2286,6 | 8,48 | | | 24168,66 | 89,58 |
| EÓLICO | | | 70,49 | 0,26 | | | 70,49 | 0,26 |
| BIOGAS | | | 42,52 | 0,16 | | | 42,52 | 0,16 |
| BIOMASA | | | 254,22 | 0,94 | | | 254,22 | 0,94 |
| FOTOVOLTAICO | | | 33,64 | 0,12 | | | 33,64 | 0,12 |
| SUBTOTAL RENOVABLE | 21882 | 81,1 | 2687,4 | 9,96 | | | 24569,52 | 91,06 |
| DIESEL | 81,51 | 0,3 | | | | | 81,51 | 0,3 |
| FUEL OIL | 1031,4 | 3,82 | | | | | 1031,42 | 3,82 |
| GAS NATURAL | 663,7 | 2,46 | | | | | 663,7 | 2,46 |
| NAFTA | | | | | | | 0 | 0 |
| RESIDUO | 383,02 | 1,42 | | | | | 383,02 | 1,42 |
| SUBTOTAL NO RENOVABLE | 2159,7 | 8 | | | | | 2159,65 | 8 |
| TIES (Importación) | | | | | 250,8 | 0,93 | 250,79 | 0,93 |
| SUBTOTAL TIE | | | | | 250,8 | 0,93 | 250,79 | 0,93 |
| TOTAL | 24042 | 89,1 | 2687,4 | 9,96 | 250,8 | 0,93 | 26979,96 | 100 |

Fuente: (MERNNR 2020)

Como se evidencia en la Tabla 2.1, la demanda del 2020 ha sido abastecida principalmente por el parque hidroeléctrico, gracias a las favorables condiciones hidrológicas que se han presentado.

2.3.3 Producción energética

En la figura 2.1 se muestra el aporte energético por tipo de generación respecto al 2019, observándose una tendencia a la baja significativa en la producción hidráulica en un 1,27%, en la producción no convencional en un 0,44%, así como en la generación termoeléctrica con un 19,37%, lo cual representa un ahorro en el uso de combustibles fósiles causando efectos positivos en la reducción de los impactos ambientales.

Se puede observar también, que ha existido un incremento significativo en las interconexiones con Colombia.

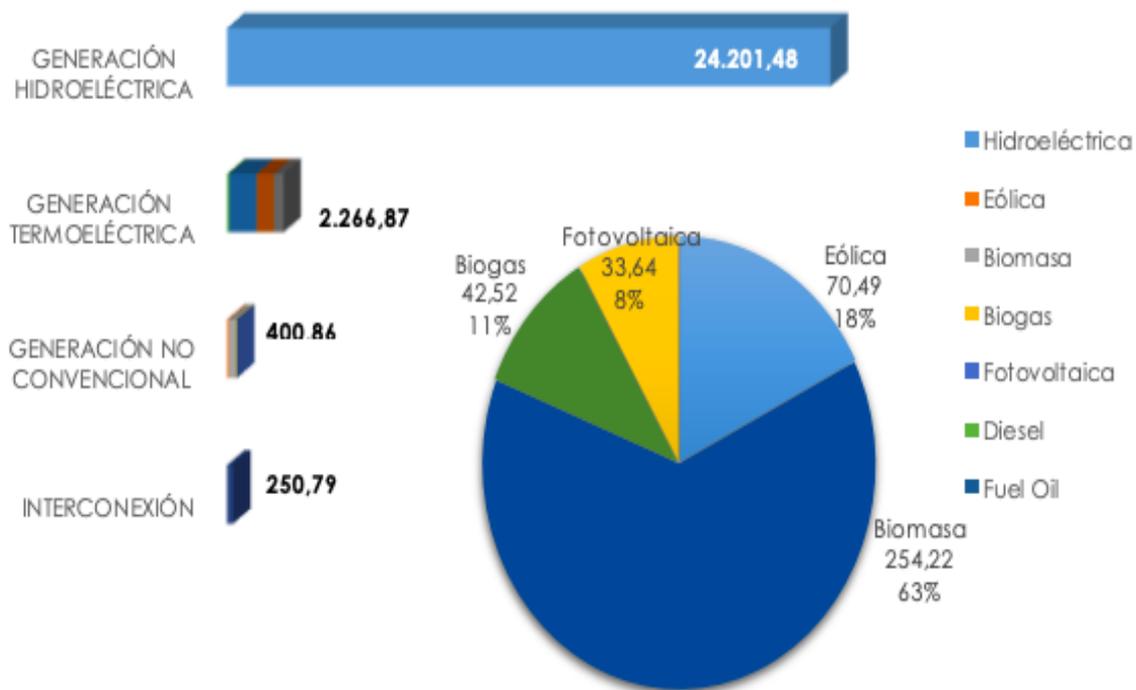


Fig. 2.1 Producción bruta energética por tipo de generación (GWh), 2020
Fuente: (Arconel 2021)

En la Figura 2.1 nos muestra la producción general energética en el Ecuador como desde mucho tiempo lo ha sido es la hidroeléctrica, pero los otros tipos de generación tienen grandes avances para tratar de sustituir a la generación hidroeléctrica.

2.3.4 Histórico producción energética

El 2020 fue un año atípico debido a la declaratoria de emergencia por COVID 19, razón por la cual se vio afectada la producción de energía, misma que tuvo una reducción del 2,21% con respecto al 2019.

Las siguiente Figura 2.2 es un histórico de la producción de energía desde el año 1999 hasta el año 2020.

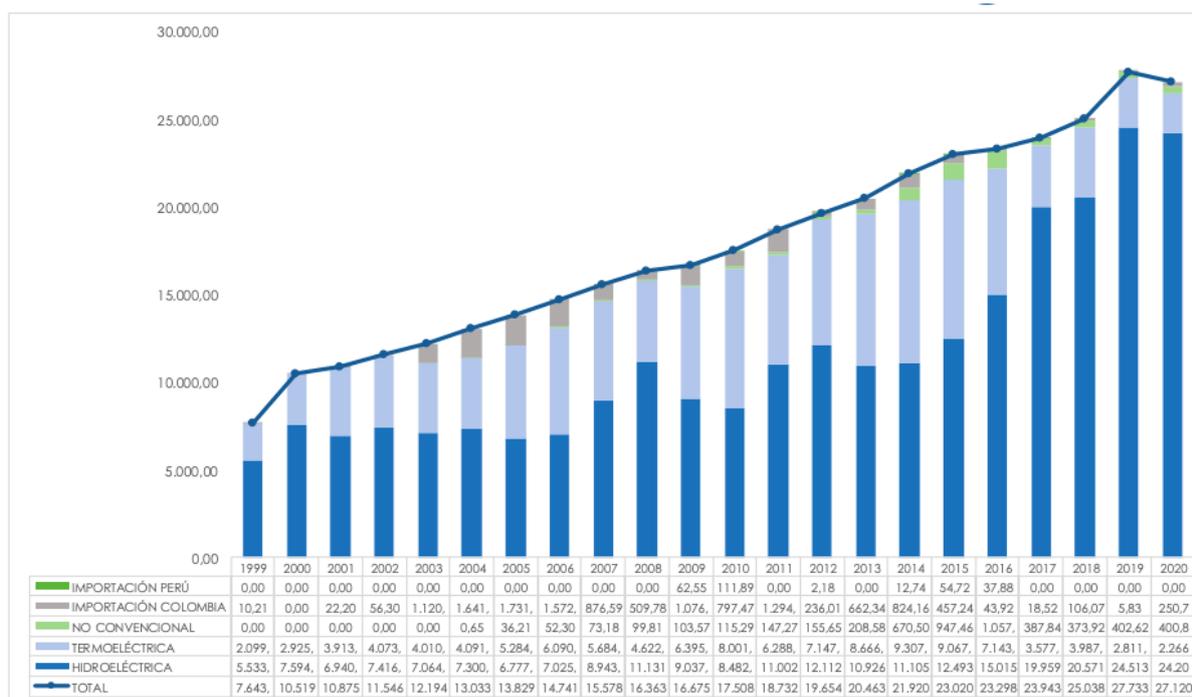


Fig. 2.2 Producción bruta de energía (GWh), 1999 – 2020
Fuente: (Arconel 2021)

En la Figura 2.2 se muestra un histórico de la producción energética y como puede observar cada año a excepción del 2020, la producción va aumentando progresivamente.

2.3.5 Empresas de generación y autogeneración

Actualmente la actividad de generación es realizada por empresas públicas y privadas debidamente habilitadas por la autoridad concedente para ejercer esta actividad. La actividad de autogeneración la realizan únicamente las empresas privadas que estén debidamente habilitadas. La liquidación de energía de la generación se realiza en función del contrato regulado que mantiene suscrito, contrato bilateral o en el caso de la generación no convencional conforme la tarifa establecida en la normativa aplicable. Para el caso de la autogeneración, las transacciones que se realiza en el mercado corresponden a los excedentes de energía, mismos que son liquidados en función a las tarifas establecidas en los contratos regulados que mantienen suscritos con las empresas de distribución. (CELEC 2021c)

La siguiente Tabla 2.2 nos detalla el número de empresas que cuentan con generación y autogeneración ya sea públicas o privadas.

TABLA 2.2
Empresas que cuentan con generacion y autogeneración

| EMPRESAS DE GENERACIÓN Y AUTOGENERACIÓN | | | |
|--|---------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| EMPRESAS PRIVADAS | N.º EMPRESAS | N.º CENTRALES DE GENERACIÓN | N.º UNIDADES DE GENERACIÓN |
| BIOGAS | 2 | 2 | 2 |
| BIOMASA | 3 | 3 | 3 |
| FOTOVOLTAICA | 24 | 24 | 24 |
| HIDROELÉCTRICA | 21 | 25 | 49 |
| TERMOELÉCTRICA | 4 | 5 | 15 |
| EMPRESAS PÚBLICAS | N.º EMPRESAS | N.º CENTRALES DE GENERACIÓN | N.º UNIDADES DE GENERACIÓN |
| EÓLICA | 1 | 1 | 1 |
| HIDROELÉCTRICA | 19 | 39 | 110 |
| TERMOELÉCTRICA | 11 | 40 | 111 |

Fuente (CELEC 2021c)

Como se observa en la Tabla 2.2 en el 2020 se registran 139 centrales de generación, de las cuales, 80 pertenecen a empresas de generación públicas y 59 a empresas de generación privadas. La generación más representativa es la que concentra en la empresa pública Corporación Eléctrica del Ecuador – CELEC EP, la cual tiene 11 unidades de negocio

2.3.6 Centrales de generación con fuentes de energía renovable

El futuro de las personas y el planeta depende de cómo generemos la energía; un sistema energético fiable, asequible y sin contaminación es fundamental. En 2020, la potencia nominal a nivel nacional fue 8.712,29 MW; de los cuales, 5.299,09 MW (60,82 %) corresponden a centrales con fuentes de energía renovable y 3.413,21 MW (39,18 %) a centrales con fuentes de energía no renovable. Las fuentes de energía renovable que aprovechó el país para la generación de electricidad en 2020 fueron: hidráulica, biomasa, fotovoltaica, eólica y biogás.

De la capacidad total instalada predominan, entre las de tipo renovable, las centrales hidroeléctricas con 5.098,75 MW (96,22 %). Estas centrales se encuentran instaladas en tres regiones del Ecuador: costa (2 provincias), sierra (9 provincias) y Amazonía (4 provincias).(Arconel 2021)

La siguiente Figura 2.3 muestra los datos de generación que se obtuvo en el año 2020 con fuentes de energía renovable.

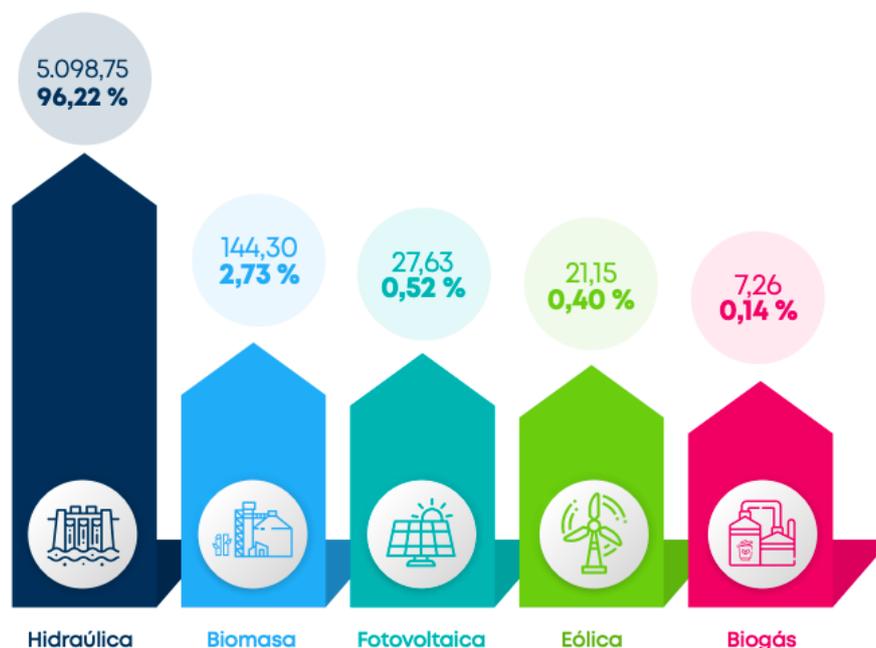


Fig. 2.3 Potencia nominal de centrales de generación con fuentes de energía renovable (MW)
Fuente: (Arconel 2021)

Como se observa en la Figura 2.3 la producción de energía con fuentes de energía renovable predomina con un rango muy alto la hidroeléctrica, pero con los grandes avances tecnológicos que existen hoy en día, la apuesta a una energía limpia está en un gran auge.

2.3.7 Centrales de generación con fuentes de energía no renovable

Estas centrales utilizan combustibles fósiles (derivados de petróleo y gas natural) como fuente energética para generar electricidad; al 2020, se registraron 3.413,21 MW de potencia nominal a nivel nacional. Las centrales de generación con fuentes de energía no renovable se encuentran instaladas en las cuatro regiones del Ecuador: costa (6 provincias), sierra (6 provincias), amazónica (5 provincias) e insular. (Arconel 2021)

La siguiente Figura 2.4 nos muestra la Potencia nominal de centrales de generación con fuentes de energía no renovable (MW)

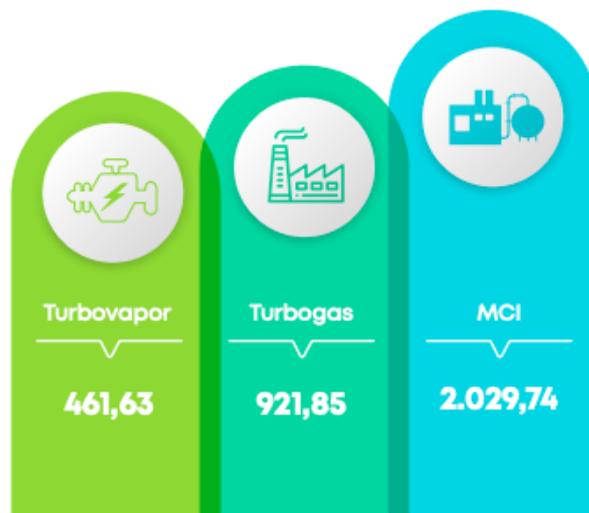


Fig. 2.4 Potencia nominal de centrales de generación con fuentes de energía no renovable (MW)
Fuente: (Arconel 2021)

Al 2020, las regiones con mayor capacidad instalada fueron: costa con 1.720,09 MW; y, amazónica con 1.409,96 MW. En Guayas se encuentran varias centrales térmicas cuya potencia es 805,21 MW. Asimismo, en Orellana se dispone de generación térmica con 783,18 MW de potencia nominal, que corresponde a empresas auto generadoras dedicadas a actividades petroleras. Como se observa en la Figura 2.4. La generación por turbovapor fue 461,63 MW, la generación turbogas 921,85 MW y la generación de motores de combustión interna 2029,74 MW.

2.3.8 Centrales de generación de sistemas aislados

Se consideran sistemas aislados aquellos que no están conectados al Sistema Nacional Interconectado (SNI), estos sistemas suministran energía eléctrica a sitios de difícil acceso; así como también, proveen electricidad a instalaciones hidrocarburíferas. A nivel nacional, la potencia nominal de los sistemas aislados alcanzó 1.372,04 MW; de los cuales, la mayor concentración se registró en Orellana con 776,18 MW (56,57 %), seguida de Sucumbíos con 408,36 MW (29,96 %)

La potencia nominal de tipo renovable en sistemas aislados alcanzó 13,88 MW; instalados en centrales hidráulicas (6,06 MW), eólicas (4,65 MW) y fotovoltaicas (3,17 MW). (ARC 2021)

La Tabla 2.3 a continuación nos muestra la potencia que entrega los sistemas aislados clasificados en tipos de energía, provincia, nombre de la empresa, tipo de central, potencia nominal y potencia efectiva.

TABLA 2.3
Potencia de centrales de generación en sistemas aislados

| Tipos de energía | Provincias | Empresa | Tipo de central | Potencia nominal (MW) | Potencia efectiva (MW) | |
|-------------------------|---------------------|----------------|------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------|
| Renovable | Chimborazo | E.E Riobamba | Hidráulica | 0.80 | 0.75 | |
| | | UCEM | Hidráulica | 2.00 | 1.90 | |
| | Cotopaxi | E.E Cotopaxi | Hidráulica | 2.80 | 2.68 | |
| | Galápagos | E.E Galápagos | Fotovoltaica | 2.60 | 2.60 | |
| | | | Eólica | 4.65 | 4.65 | |
| | Imbabura | Hidrotavalo | Hidráulica | 0.40 | 0.40 | |
| | Morona Santiago | E.E Centro Sur | Fotovoltaica | 0.37 | 0.37 | |
| | Pastaza | E.E Ambato | Fotovoltaica | 0.20 | 0.20 | |
| | Pichincha | EMAPAS | Hidráulica | 0.06 | 0.06 | |
| | No Renovable | Cañar | UCEM | Térmica | 3.63 | 2.50 |
| Esmeraldas | | OCP Ecuador | Térmica | 1.72 | 1.72 | |
| Galápagos | | CELEC | Térmica | 24.29 | 21.14 | |
| | | Termopichincha | | | | |
| Guayas | | CELEC | Térmica | 2.25 | 2.03 | |
| | | Termopichincha | | | | |
| Napó | | Agip | Térmica | 9.00 | 7.78 | |
| | | OCP Ecuador | Térmica | 10.02 | 7.89 | |
| | | Petroamazonas | Térmica | 58.61 | 38.78 | |
| Orellana | | Andes Petro | Térmica | 68.40 | 57.27 | |
| | | | CELEC | Térmica | 54.40 | 46.60 |
| | | | Termopichincha | | | |
| | | | Petroamazonas | Térmica | 489.20 | 356.44 |
| | | | Repsol | Térmica | 144.34 | 120.42 |
| | | | Sipac | Térmica | 19.84 | 16.05 |
| Pastaza | | Agip | Térmica | 46.06 | 40.43 | |
| | | Petroamazonas | Térmica | 15.04 | 10.53 | |
| Pichincha | | OCP Ecuador | Térmica | 0.32 | 0.32 | |
| | | Andes Petro | Térmica | 98.50 | 82.40 | |
| Sucumbíos | | CELEC | Termopichincha | Térmica | 11.00 | 10.80 |
| | | | | | | |
| | OCP Ecuador | Térmica | 10.02 | 9.50 | | |
| | Orión | Térmica | 2.68 | 2.16 | | |
| | Petroamazonas | Térmica | 279.48 | 198.57 | | |
| Repsol | Térmica | 9.37 | 6.75 | | | |
| Total | | | | 1372,04 | 1055.70 | |

Fuente: (MERNNR 2020)

En la Tabla 2.3 la generación aislada tiene muy buena producción de energía; pero comparado con la producción nacional es muy pequeña. los datos que nos muestra la tabla sobre la generación aislada como se puede observar, la mayor parte alimentan de electricidad a instalaciones hidrocarbúferas.

2.4 Fuentes de generación de energía eléctrica en el Ecuador

En la actualidad el 92% de la generación de energía en el país proviene de centrales hidráulicas, el 7% de térmicas y el 1% de fuentes no convencionales (fotovoltaica, eólica, biomasa, biogás, geotermia, entre otras). Esta producción, que se caracteriza por energías amigables con el ambiente, cubre los requerimientos eléctricos nacionales, así como la exportación de electrones a los países vecinos.(Arconel 2021)

Para consolidar una matriz energética limpia, el Gobierno Nacional implementa políticas encaminadas al fortalecimiento de la confianza de inversionistas en proyectos para el Ecuador, a través de un marco legal basado en la seguridad jurídica y procesos públicos transparentes, que incluyen mecanismos de alianzas público-privadas, con regulaciones previsibles y simplificadas, así como con esquemas tarifarios favorables e incentivos al sector privado.(Arconel 2021)

A continuación, se realiza una revisión del estado del arte de las fuentes de generación de energía más representativas del Ecuador como es:

- Generación Hidroeléctrica.
- Generación Eólica.
- Generación de Biomasa.
- Generación Fotovoltaica.
- Generación Geotérmica.

2.4.1 Generación hidroeléctrica

En el Ecuador desde el año 2007 empieza una transformación en el sector eléctrico. Para garantizar el abastecimiento de energía se prioriza la utilización de fuentes de energía renovables, especialmente en las hidroeléctricas, con esto se puede asegurar la estabilidad eléctrica del sistema y manteniendo márgenes de reserva para enfrentar periodos futuros de sequía. (CELEC 2021c)

Se construyen importantes proyectos hidroeléctricos que a partir del año 2016 están en funcionamiento y se ponen al servicio, para el beneficio de todos los ecuatorianos; estos proyectos son: el embalse Mazar, que fortaleció energéticamente el complejo Integral Paute gracias a su gran capacidad de almacenamiento de 410 Hm³ de agua, las centrales hidroeléctricas San Francisco, Mazar, Ocaña y Baba, con un total de 468 MW de potencia instalada; cuatro de los ocho proyectos hidroeléctricos emblemáticos, Manduriacu, Alazán (del proyecto Mazar Dudas), Sopladora y Coca Codo Sinclair con una capacidad total de 2059 MW; (CELEC 2021c)

2.4.1.1 Energía hidráulica

Se basa en aprovechar la caída del agua desde una altura determinada. La energía potencial, se convierte en cinética durante la caída. El fluye a través de las turbinas a alta velocidad, y crea un movimiento de rotación que finalmente, se transforma en energía eléctrica mediante generadores. La energía hidráulica como fuente de energía se utiliza casi en exclusividad para producción de energía eléctrica, verificándose que la transformación energética se realiza con un rendimiento muy alto, a diferencia de lo que ocurre con otras fuentes de energía.(Mírez 2016)

2.4.1.2 Centrales Hidroeléctricas en el Ecuador

Las centrales hidroeléctricas, con embalse de regulación, con las que cuenta el Ecuador son:

- Paute – Molino, de 1.100 MW de potencia efectiva, de CELEC EP – Unidad de Negocio Hidropaute (Presa Daniel Palacios, Embalse Amaluza).
- Marcel Laniado de Wind, de 213 MW, CELEC EP – UN Hidronación (Embalse Daule Peripa).
- Mazar, de 170 MW de CELEC EP – UN Hidropaute (Embalse Mazar).
- Pucará, de 70 MW de CELEC EP – UN Hidroagoyán (Embalse Pisayambo).
- Baba (42 MW), de CELEC EP – UN Hidronación (Embalse Baba).

Las principales centrales hidroeléctricas pasadas, son:

- Coca Codo Sinclair, 1.500 MW de potencia nominal, 1.476 MW de potencia efectiva, de CELEC EP – Unidad de Negocio Coca Codo Sinclair (con embalse compensador de regulación intradiaria)
- Sopladora, de 486,90 MW de potencia efectiva, CELEC EP – UN Hidropaute.
- Minas – San Francisco, 274,50 MW, CELEC EP – UN Enerjubones (con embalse de regulación intradiaria)
- San Francisco, de 212 MW, CELEC EP – UN Hidroagoyán.
- Delsitanisagua, 180 MW, CELEC EP – UN Gensur (con embalse de regulación intradiaria).
- Agoyán, 156 MW), de CELEC EP – UN Hidroagoyán (con embalse de regulación intradiaria)
- Manduriacu, 65 MW, CELEC EP – UN Coca Codo Sinclair (con embalse de regulación intradiaria)
- San Bartolo, 49,95 MW, Hidrosanbartolo.
- Due, 49,71 MW, Hidroalto
- Normandía, 49,58 MW, Hidronormandía
- Cumbayá, 40 MW, Empresa Eléctrica Quito S.A

2.4.1.3 Coca Codo Sinclair la principal hidroeléctrica del Ecuador

La Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair de 1500 MW de potencia se encuentra ubicada en las provincias de Napo y Sucumbíos, cantones El Chaco y Gonzalo Pizarro. La Central Hidroeléctrica inició su construcción en julio de 2010 y fue inaugurada el 18 de noviembre de 2016, ha aportado al S.N.I. una energía neta de 33.350,66 GWh desde abril de 2016 hasta septiembre de 2021. Central que aprovecha el potencial de los ríos Quijos y Salado que forman el río Coca, en una zona en la que este río describe una curva en la que se presenta un desnivel de 620 m, con un caudal medio anual de 287 m³/s para su generación hidroeléctrica. (Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables 2021)

Coca Codo Sinclair está conformado por una obra de captación constituida por una presa de enrocado con pantalla de hormigón de 31.8 m de altura, vertedero con un ancho neto de 160 m, desarenador de 8 cámaras y compuertas de limpieza que permiten transportar el caudal captado hacia el Embalse Compensador a través de un Túnel de Conducción de 24.83 km de longitud y un diámetro interior de 8.20 m, gracias a una caída de 620 m desde el embalse compensador a la casa de máquinas permitirá transformar la energía potencial en energía eléctrica a través de 8 unidades tipo Pelton de 187.5 MW cada una. (Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables 2021)

La Figura 2.5 a continuación nos muestra la representación tradicional de una central hidroeléctrica con sus respectivas partes.

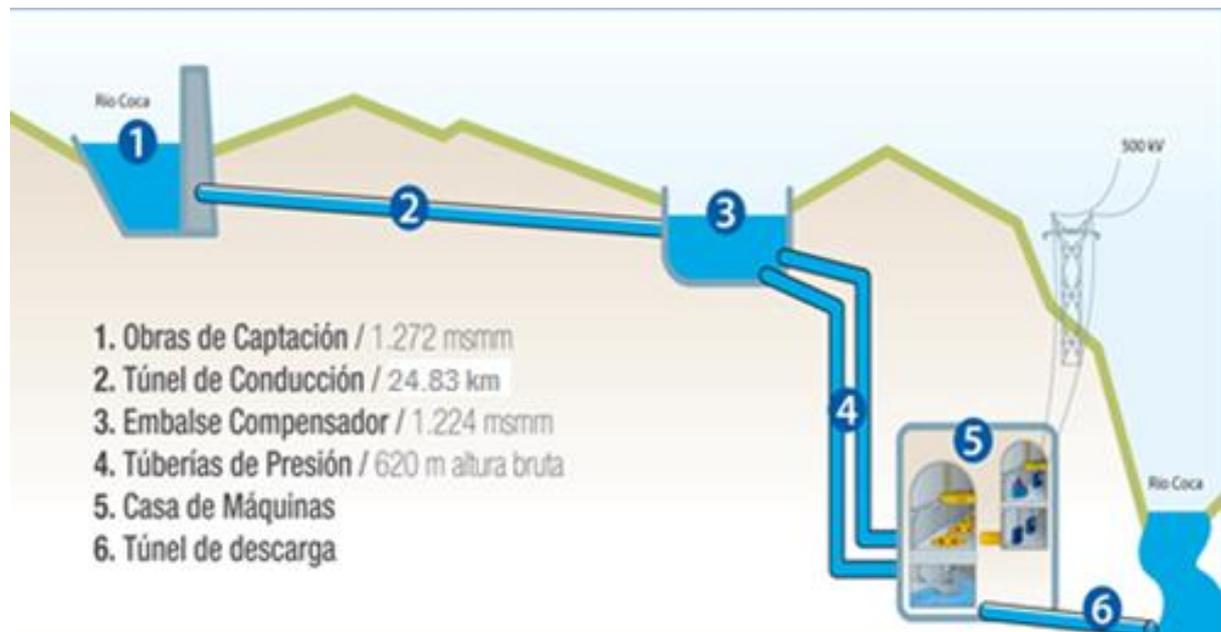


Fig. 2.5 Esquema gráfico de la hidroeléctrica Coca Codo Sinclair.
Fuente:(Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables 2021)

En la Figura 2.5 tenemos la estructura básica de la hidroeléctrica Coca Codo Sinclair cuenta con dos embalses, el principal que recauda el agua del río Coca (1) y el secundario que es un embalse compensador (3), que recibe el afluente transportado por un túnel de conducción (2), al salir del embalse pasa por tuberías de presión (4), que le llega al cuarto de máquinas (5), donde ocurre todo el proceso de transformación de energía y es distribuida al resto del país. Pasado por el cuarto de máquinas el líquido vital sale por el túnel de descarga (6), en donde continua con su afluente continuando con el río Coca.

2.4.2 Generación Eólica

La energía eólica es una de las fuentes de energía con mayor crecimiento de implantación en el mundo. Su aparición a finales del siglo XX para la generación de energía eléctrica limpia, la ha conducido rápidamente a ser una fracción importante de la generación eléctrica en muchos países. (Barragán 2015)

Para que este hecho llegara a producirse, han tenido que unir varios factores, entre los que se pueden calificar cinco como los decisivos.

Primero, la necesidad ligada al progresivo agotamiento de los combustibles fósiles. Segundo, el potencial existente en varias partes del Globo, del suficiente recurso eólico. Tercero, la capacidad tecnológica para desarrollar aerogeneradores cada día más eficientes. Cuarto, la visión de los pioneros en este campo quienes en la segunda mitad del siglo pasado dirigieron el desarrollo tecnológico para conducirnos a la situación actual. Y, por último, la voluntad política para facilitar la implantación de la energía eólica, tanto en lo que se refiere a la tramitación administrativa como a la retribución para el productor.(MEER 2019)

2.4.2.1 Energía eólica

Es la energía que se obtiene del viento. Se trata de un tipo de energía cinética producida por el efecto de las corrientes de aire. Esta energía la podemos convertir en electricidad a través de un generador eléctrico. Es una energía renovable, limpia, que no contamina y que ayuda a reemplazar la energía producida a través de los combustibles fósiles.(Moratilla Soria 2016)

2.4.2.2 Fuentes eólicas en el Ecuador

La energía eólica es una de las tecnologías con un alto potencial técnico y económico en el país. Con una tendencia a la baja respecto a sus costos de instalación y que en ciertas zonas del país se ha evidenciado se puede sobrepasar los factores de planta del 50%. En este sentido el MERNNR y CELEC EP han venido desarrollando mediciones del potencial

eólico en distintos sitios del país y varias de estas mediciones certificadas para su potencial desarrollo. (Párraga, Intrago, and Velasco 2019)

Próximos proyectos eólicos que están en estudio en el Ecuador:

- Carchi Proyecto García Moreno Potencia estimada 33 MW
- Imbabura Proyecto Salinas Potencia estimada 25 MW
- Pichincha Proyecto Cochapamba Potencia estimada 100 MW
- Cotopaxi Proyecto Maca Grande Potencia estimada 100 MW
- Chimborazo Proyecto El Arenal Potencia estimada 57 MW
- Loja Proyecto Huacacocha Potencia estimada 62 MW
- Loja Proyecto Cachipamba Potencia estimada 80 MW
- Loja Proyecto Ducal Membrillo Potencia estimada 100 MW
- Guayas Proyecto Posorja Potencia estimada 100 MW

2.4.2.3 Central Eólica Villonaco la más representativa del Ecuador

La Central Eólica Villonaco de 16.5 MW de potencia se encuentra ubicado en la provincia de Loja, cantón Loja. Es la primera Central Eólica en Ecuador Continental.

La Central Eólica inició su construcción en agosto de 2011 y se encuentra operando de forma normal y continua sobre la base de los requerimientos del sistema eléctrico ecuatoriano desde el 2 de enero de 2013 (CELEC 2021a)

La siguiente Figura 2.6 es una fotografía panorámica del parque Eólico Villonoco donde funciona la central eólica con el mismo nombre.



Fig. 2.6 Central Eólica Villonaco
Fuente: (CELEC 2021a)

En la Figura 2.6 nos muestra la central eólica Villonaco que cuenta con 11 aerogeneradores del tipo GW70/1500 de 1.5 MW cada uno, con una velocidad promedio anual de 12.7 m/s a una altitud de 2700 msnm. La Central se desarrolla a lo largo de la línea de cumbre del cerro Villonaco con una distancia aproximada de 2 km. La subestación de elevación Villonaco 34.5 kV/69 kV tiene una capacidad de 25 MVA y presenta un esquema de conexión de barra principal y transferencia. La subestación Loja, contempla la instalación de una bahía de 69 kV, la cual recibe la energía proveniente de la subestación Villonaco para ser conectada al sistema nacional interconectado (S.N.I).

2.4.3 Generación de Biomasa

Los primeros biocombustibles que se propuso producir en gran escala fueron los llamados de primera generación que provienen de la síntesis de materia prima alimentaria como maíz y caña de azúcar para etanol (gasolina) y soya y aceite de palma para biodiésel. Entre los principales objetivos políticos perseguidos por los gobiernos tras la promoción de los biocombustibles se enfatiza el logro de una mayor seguridad energética y ahorros de divisas, gracias a una reducción de las importaciones de petróleo; la promoción del desarrollo rural; el desarrollo de un sector exportador y ayudar a mitigar el problema de cambio climático. (González et al. 2018)

Los biocombustibles de segunda generación tienen menor impacto en el uso de agua, inclusive aquellos de cultivos energéticos pues utilizan todo el vegetal para la conversión de material lignocelulósico. Los biocombustibles a base de residuos agrícolas pueden tener menor impacto en el uso del agua, pero en los procesos de conversión requieren mayor cantidad que los de primera generación, por implicar más procesos. Sin embargo, el diseño de recirculación de agua en plantas procesadoras puede contribuir a reducir el impacto en el uso del recurso. (Muñoz Chumo, Balderramo Vélez, and Pico Mera 2018)

2.4.3.1 Energía por biomasa.

Se considera biomasa a un grupo de productos energéticos y materias primas de tipo renovable que se originan a partir de materia orgánica formada por vía biológica. Esta definición excluye expresamente los combustibles fósiles y las materias orgánicas derivadas de aquellos, como los plásticos y productos sintéticos. (Torres 2019)

2.4.3.2 Fuentes por biomasa en el Ecuador

La biomasa en el Ecuador es un recurso que, para propósitos de generación de energía eléctrica, proviene fundamentalmente del procesamiento de la caña de azúcar, palma africana

y cascarilla de arroz. Si bien en la actualidad el recurso proveniente de la caña de azúcar ya es utilizado en la generación de energía eléctrica, la biomasa proveniente del procesamiento de la palma africana para la obtención de aceite, así como la cascarilla de arroz son recursos que aún no han sido explotados para estos propósitos. En el año 2015 el Ecuador desarrolló el Atlas Bioenergético que contiene mayor detalle de potencial aprovechamiento de biomasa para generación de energía eléctrica. Se podrán también ofertar proyectos que utilicen biogás o residuos sólidos urbanos.(Rodríguez 2017)

Detalle de los proyectos de biomasa:

- Esmeraldas: palma (13MW, 15MW, 6.60MW)
- Santo Domingo: palma (15MW)
- Los Ríos: arroz (9MW)
- Guayas: arroz (10MW)

Es importante establecer que las fuentes de este tipo de recursos primarios se encuentran disponibles en varias zonas del país, por lo que se deberá considerar para este tipo de proyectos el transporte y su almacenamiento, tomando en cuenta la descomposición orgánica de este recurso.

2.4.4 Generación Fotovoltaica

Se aprovecha el sol para generar energía limpia y económica, transformando la radiación solar en electricidad.

Con un sistema de generación de energía fotovoltaica se puede acceder a la electricidad en cualquier lugar donde tengas espacio y esté libre de sombras. Si tienes un techo libre de sombras, o un terreno sin utilizar es un perfecto espacio para instalar un sistema eléctrico y convertir el gasto en un activo que reduce los costos operativos.(Muñoz, Rojas, and Barreto 2018)

2.4.4.1 Energía Solar

Esta energía se obtiene de la radiación solar que llega a la tierra. Se le considera un tipo de energía limpia y renovable ya que su fuente, el Sol es un recurso ilimitado. La radiación electromagnética que proviene del sol puede ser recolectada por distintos medios como colectores térmicos, células fotovoltaicas, entre otras, con el fin de transformar la energía solar en energía eléctrica.(Gómez, Murcia, and Cabeza 2017)

2.4.4.2 Fuentes fotovoltaicas en el Ecuador

Ecuador tiene un potencial aprovechable de 660 MWp fotovoltaicos. Este potencial fue identificado mediante un análisis multicriterio y con información secundaria disponible,

considerando lugares con alto nivel de irradiación, factibilidad de conexión y zonas que no presenten limitaciones ambientales, sociales, etc., las provincias identificadas son: Carchi, Pichincha, Cotopaxi, Manabí, Imbabura, Chimborazo, El Oro, Loja y Guayas. La energía solar fotovoltaica según la zona en que se analice dicho potencial es una de las tecnologías con un alto potencial aprovechable. La tecnología fotovoltaica ha tenido una disminución sustancial en los costos de instalación y continúa con una tendencia a la baja.(Lascano 2019)

2.4.4.3 Manabí tendrá la central de energía fotovoltaica más grande del país

Se trata de un proyecto que aprovechará la radiación solar (energía renovable no convencional), a través del uso de paneles fotovoltaicos, para la producción de energía eléctrica.

Esta central se ubicará en terrenos que fueron adquiridos para la construcción de la refinería del Pacífico, en el sector El Aromo, a 20 kilómetros de Manta. Para el desarrollo de este proyecto se espera una inversión aproximada de 200 millones de dólares, los mismos que provendrán de capitales privados.

Aromo va a multiplicar casi por diez la capacidad solar de Ecuador, añadiendo 258 MW a la producción actual de 27 MW. Si bien esto refleja un aumento espectacular, representa solo una parte muy pequeña de la matriz energética nacional.(CELEC 2019)

2.4.5 Generación Geotérmica

Se denomina generación geotérmica a una concentración natural de calor terrestre que se presenta en algunas zonas favorables de la corteza y es susceptible de extraerse con la tecnología actual. El termino geotérmico indica su relación con la energía calórica interna de la tierra y, en general, se lo emplea para designar sistemas en los cuales el calor terrestre se encuentra suficientemente concentrado, como para constituir un recurso energético.

2.4.5.1 Energía térmica

Es la energía contenida en un sistema y que es responsable de su temperatura. La energía térmica siempre se asocia con el calor y, de hecho, el calor es el flujo de esa energía térmica. Este tipo de energía es la más antigua que utilizamos y una de las más importantes, para la generación de energía en general. De hecho, hay toda una rama de la física, la termodinámica, que estudia cómo se transfiere el calor entre sistemas y el trabajo que se realiza en el proceso.(Saldías and Ulloa 2012)

2.4.5.2 Fuentes geotérmicas en el Ecuador

El potencial teórico y potencial geográfico geotérmico para generación eléctrica (considerando proyectos de prefactibilidad), en términos de capacidad instalable, en nuestro país es estimado en 6.500MW y 1.101MW respectivamente. (Peláez and Espinoza 2015) A continuación, se muestra la Tabla 2.4 que indica el resumen de los proyectos geotérmicos para la generación eléctrica en el país.

TABLA 2.4
Proyectos geotérmicos para la generación eléctrica en el país.

| Nombre del proyecto | Estado de avance | Potencial técnico-geográfico (MW) |
|-----------------------------------|------------------|-----------------------------------|
| Tufiño-Chiles (binacional) | Exploración | 330 |
| Chachimbiro | Exploración | 178 |
| Chacana | Exploración | 310 |
| Chalupas | Exploración | 283 |
| Total | | 1101 |

Fuente: (Peláez and Espinoza 2015)

Como se puede observar en la Tabla 2.4 los proyectos son excelentes, pero aún están en etapa de investigación por lo que será, pero será un buen sustento de energía limpia en el futuro.

2.4.5.3 Chachimbiro, Imbabura tendrá la primera central geotérmica del país

En Chachimbiro se perforó el primer pozo geotérmico exploratorio. Los estudios se financiaron con recursos no reembolsables del Gobierno de Japón, a través de la Agencia de Cooperación Internacional (JICA, por sus siglas en inglés).

La Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC 2021c) aprobó el cierre de una línea de crédito para el desarrollo del proyecto geotérmico Chachimbiro, de 50 megavatios, el mismo que estará ubicado en la provincia de Imbabura en el cantón Urcuquí y que será asesorado por el Gobierno de Japón a través de la Agencia de Cooperación Internacional de Japón.

Desde marzo del 2018 se realizan pruebas en el primer pozo exploratorio, con resultados satisfactorios, ya que se han encontrado temperaturas de 235°C que son ideales para la instalar un sistema geotérmico. El proyecto se encuentra actualmente en la fase de desarrollo de campo; en esta fase, también se instalará una turbina cinco megavatios, a boca pozo, en el año 2022.(Recursosyenergia 2019)

CAPÍTULO 3

Tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica que se pueden utilizar en el Ecuador

En el siguiente capítulo se tiene como finalidad dar a conocer las tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica que son aptas para implementar en el sector eléctrico ecuatoriano, analizando todos los cambios y avances de importancia que se puedan dar, para así ayudar al mejoramiento y crecimiento del sistema energético. También, se hace un análisis comparativo de los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica aptas para el Ecuador.

3.1 Metodología

Para desarrollar el siguiente análisis acorde con lo establecido en el tercer objetivo específico y tener los resultados esperados, se ha seguido la siguiente metodología en la cual constan los pasos descritos a continuación:

- Se examinó la información disponible que brindan las principales instituciones públicas que trabajan constantemente para el desarrollo del sector eléctrico ecuatoriano tomando en cuenta el último Plan Maestro de Electrificación (PME) y trabajos de investigación referentes al tema, para tener una idea de los proyectos y nuevas tecnologías que pueden ser implementadas en el Ecuador.
- Asimismo, se procedió a estudiar revistas y trabajos relacionadas a las perspectivas de desarrollo de los sectores eléctricos Latinoamericanos verificando sus datos con las publicaciones de los entes reguladores de cada país analizado.

3.2 Tecnológicas de almacenamiento eléctrico

En esta sección identificamos algunas de las tendencias que, previsiblemente marcarán la evolución del sector de almacenamiento de energía eléctrica a lo largo de los próximos años. Dicha evolución esta determinada por el desarrollo de un amplio rango de factores tecnológicos, de mercado y regulatorios. (García 2017)

Los sistemas de tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica están en un auge considerable ya que son muy importantes para cuidar nuestro planeta y ayuda a consumir moderadamente la energía que se genera día a día.

3.2.1 Almacenamiento mecánico

El almacenamiento mecánico permite almacenar la energía bien como energía potencial (principalmente a través de la gravedad o la compresión) o bien como potencia cinética (por su movimiento). Existe una amplia variabilidad de tecnologías capaces de almacenar energía mecánica, entre las que destacan por su uso el almacenamiento hidráulico, el aire comprimido y líquido y los volantes de inercia. (Ortiz 2017)

El almacenamiento hidráulico en grandes presas es la forma de almacenar energía teléctrica más extendida en la actualidad. Este almacenamiento puede dividirse en tres tipos: con aporte de caudal hídrico (procedente de un río) y no reversible, con aporte de caudal hídrico y reversible y sin aporte de caudal hídrico y reversible (aprovechando un salto de altura cercano a un aprovisionamiento de agua). Estos dos últimos, que conforman propiamente el almacenamiento flexible de energía eléctrica, requieren de una doble presa, superior e inferior, la primera con una turbina para la generación eléctrica y la segunda con una bomba para el consumo de electricidad. (Marín 2017). Cuenta con una gran capacidad de almacenar energía en el largo plazo, importantes capacidad y densidad de energía (fuertemente dependiente del emplazamiento), un alto grado de flexibilidad de potencia generada y absorbida y un rendimiento destacable. Su principal desventaja es su limitación espacial, estando copados los principales emplazamientos para la hidráulica en los países desarrollados, además cuenta con la función de proporcionar agua para el suministro de la población (de consumo y/o regadío) y la presa debe respetar el caudal ecológico de los ríos. (Roca and Perero 2016)

El aire comprimido es un vector energético contemporáneo de la electricidad, ya que su uso puede remontarse a mediados del siglo XIX. Si bien no cuenta con un protagonismo tan relevante como el de los derivados del petróleo, el gas y la electricidad, el aire comprimido es, por su uso el cuarto vector energético en la industria. En esta tecnología es almacenada en forma de aire comprimido en cámaras subterráneas. Cuando la demanda es baja el aire es comprimido a la cámara y el excedente energético es almacenado. La energía almacenada en el aire comprimido puede ser convertida en electricidad por medio de turbinas de gas convencionales. La práctica más común es hacerlo en dos etapas, empleando turbinas de baja presión conectadas a turbinas de alta presión. El aire también es mezclado con gas natural y quemado. Adicionalmente, los humos de escape de las turbinas son utilizados para precalentar el aire comprimido y aprovechar al máximo su producción. (Mírez 2016)

3.2.2 Almacenamiento químico

El principal almacenamiento químico de energía eléctrica son las baterías, aunque existen otras opciones de almacenamiento de energía eléctrica a partir de reacciones químicas. En el plano tecnológico se espera un desarrollo significativo de las baterías eléctricas basadas en ion-litio en los próximos diez años, con menores costes de producción y mejoras en su rendimiento electroquímico y en sus prestaciones. Las nuevas generaciones de baterías de ion-litio ofrecerán una mayor densidad de energía y de potencia, un incremento en el número de ciclos y en la potencia de carga y recarga, menor tasa de autodescarga, mayor estabilidad térmica y mayor durabilidad. (Rodríguez 2020)

La integración de energías renovables en las redes de distribución ofrece también oportunidades de desarrollo para este tipo de tecnología. Con el desarrollo tecnológico de las baterías se puede implementar un sistema híbrido solar fotovoltaica-almacenamiento. Esta batería se conecta en corriente continua al conjunto de paneles fotovoltaicos, lo que hace un sistema óptimo sobre todo el proceso de inversión frente a otras soluciones que se conectan en corriente alterna, facilitando la integración de las instalaciones fotovoltaicas en la red y mejorando sus prestaciones en términos de flexibilidad. (Alzola and Fernández 2018)

3.2.3 Almacenamiento térmico

El calor es un vector energético de suma importancia para la industria, por lo que el desarrollo de sistemas de almacenamiento térmico tiene una gran importancia directa en este sector. Su enlace con el sector eléctrico cuenta con tres líneas principales: la generación de calor a partir de electricidad, que en combinación con el almacenamiento térmico permite desplazar en el tiempo el consumo energético; el almacenamiento de calor en centrales geotérmicas, para desplazar en el tiempo la producción de energía eléctrica; y el almacenamiento de electricidad, línea que no ha alcanzado un nivel comercial, pero que supone una línea de trabajo importante con potencial dentro de la transición energética. Aparte, cabe destacar el empleo del almacenamiento térmico para mejorar el rendimiento de otros vectores energéticos, incluyendo el aire comprimido (en almacenamiento adiabáticos), el hidrógeno (en cogeneración) y el biogás (aportando calor para la conversión de hidrógeno en biometano). (Witt 2019)

Respecto al almacenamiento de calor, diferentes tecnologías pujan por posicionarse en las diferentes aplicaciones de este segmento. El calor puede almacenarse como calor sensible (como variación de temperatura) o calor latente (como cambio de fase, por ejemplo, de líquido a sólido), aunque se está explorando también el almacenamiento termoquímico. A su vez, el medio que almacena el calor puede ser de cuatro tipos en función del estado de la materia en

que se encuentre: sólido (rocas, arena), líquido (agua, aceite, sales fundidas), gaseoso (vapor de agua) o en diferentes fases. En los medios líquidos y gaseosos el propio medio que almacena el calor es el encargado de transmitirlo (mediante bombeo o mediante convección natural), mientras que en el caso de los otros medios debe introducirse o extraerse el calor a través de un circuito de refrigeración reversible. En todos los casos, la eficiencia del almacenamiento suele estar ligada al aislamiento que proporciona el material que contiene al medio que lo almacena, aunque también influyen las características del propio material (por ejemplo, su conductividad térmica). (Ramirez et al. 2020)

3.3 Clasificación de los sistemas de almacenamiento de energía

La energía eléctrica se puede transformar y transportar, pero la acumulación en grandes cantidades de la misma resulta complicado, por ello preservar la energía se ha convertido en todo un reto. A pesar de ello, son muchos los sistemas de almacenamiento de energía que se pueden utilizar en el Ecuador, diferenciándose en:

- A gran escala
- Almacenamiento en redes
- A nivel usuario

3.3.1 Almacenamiento de energía a gran escala

La energía eléctrica de tipo AC no puede ser almacenada de una forma óptima, sin embargo, dicha energía puede ser almacenada al ser convertida en energía electromecánica, térmica, cinética y como energía potencial. Dos factores son determinantes a la hora de seleccionar un ESS, uno es la cantidad de energía que requiere ser almacenada y el otro es la tasa a la cual dicha energía puede ser almacenada y/o liberada según sea requerida. (Sanz 2021)

Algunos ejemplos de este tipo de almacenamiento en el Ecuador son: los sistemas Almacenamiento hidráulico bombeado y térmico.

A continuación, en la Tabla 3.1 se muestra una tabla comparativa de dos sistemas de almacenamiento de energía.

TABLA 3.1
Comparación de tecnologías de almacenamiento a gran escala

| Tipo | Hidráulico bombeado | Térmico. |
|---------------------------------------|---|---|
| Energía específica (kW/kg) | 0.3-1.33 | 10-250 |
| Potencia específica (W/kg) | 0.001-0.12 | 10-30 |
| Ciclos de vida | 20-50k | Indefinido |
| Vida útil | 50-60 | 20+ |
| Comentarios del ciclo de vida. | Vida casi indefinida con un buen mantenimiento | Vida casi indefinida con un buen mantenimiento |
| Costo por kWh | \$ 1-291 | \$ 1-137 |
| Impacto ambiental | Alto | Alto/Medio |
| Ventajas | Gran capacidad de potencia, externalidades positivas. | Escalable, de bajo costo, a gran escala |
| Desventajas | Limitada geográficamente, construcción costosa, baja densidad de energía y daño ambiental | No totalmente comercial Requiere grandes paredes adiabáticas |

Fuente:(Sanz 2021)

Los tipos de tecnologías de almacenamiento señalados en la Tabla 3.1 sirven para tener un almacenamiento a escala masiva, pero con un tiempo de respuesta de entrega de energía muy alto.

El almacenamiento hidráulico bombeado se debe utilizar en la mayoría de las centrales hidroeléctricas del país, aprovechando al máximo el recurso hídrico posible para convertirla en energía.

Como se puede observar en la Tabla 3.1 tiene una energía específica en la cual por cada 1.33 litros de agua se obtiene 0.33 Kilovatios de energía específica sabiendo que (El agua tiene una densidad de 1kg/l, es decir, 1 litro de agua tiene una masa de 1 kilogramo). Con respecto a los ciclos de vida consta entre los 20 a 50000 ciclos dependiendo del sistema de bombeo. Una vida útil bastante alta entre los 50 a 60 años, esto depende de mantenimiento adecuado que se realice ya que la cifra variar mucho. En cuanto a la tarifa de almacenamiento se establece entre 1 y 291 dólares, como se observa tiene un gran margen ya que todo depende de cada tipo de embalse ya que tiene muchos aspectos a considerar como son: la altura a alcanzar, el volumen de agua, el tiempo de bombeo, número de bombas etc. Acerca del impacto ambiental que genera es alto ya que daña el flujo general del agua y la fragmentación del sistema fluvial que impacta sobre los organismos que viven en la zona.

El almacenamiento térmico es muy buena opción para implementarla en el país, teniendo en cuenta los nuevos proyectos geotérmicos que actualmente están en investigación. En la Tabla 3.1 nos muestra que la energía específica que brinda este sistema de almacenamiento es que, por cada 250kg de agua, sales fundidas, metales, aleaciones líquidas etc. se obtiene 10 kilovatios de energía. Con respecto al ciclo de vida se tiene que es indefinido, que se puede reutilizar los materiales las veces que sea necesario si se los trata correctamente, mientras que los años de vida de la planta está por encima de los 20 años los cuales varían dependiendo del mantenimiento. Con respecto a la tarifa de almacenamiento se establece entre 1 y 137 dólares, esto varía en función del tipo de planta, materiales usados etc. En cuanto el impacto ambiental que puede producir esta tecnología se encuentra en el rango de alto-medio, con daños al ecosistema, daños a la atmosfera por el smock que emana etc. La gran desventaja que tiene es con respecto a las paredes adiabáticas que o permiten intercambio de calor con el exterior, pero pueden permitir otro tipo de intercambio (trabajo y materia).

3.3.2 Almacenamiento en redes

El almacenamiento me escala principalmente son sistemas pequeños de una industria o sistemas que son integrados a la red nacional. Un ejemplo de esto son las micro redes. Esta integra energías renovables, bancos de almacenamiento de energía, medidores inteligentes; de esta manera se reduce pérdidas, además de mejorar la calidad del servicio en el suministro de energía. (Peña, Santos, and Trujillo 2020)

A continuación, en la Tabla 3.2 se muestra una tabla comparativa de varios sistemas de almacenamiento de energía.

TABLA 3.2
Comparación de tecnologías de almacenamiento en red

| Tipo | Volantes de inercia. | Baterías de litio |
|---------------------------------------|--|---|
| Energía específica (kW/kg) | 5-200 | 90-250 |
| Potencia específica (W/kg) | 400-30000 | 8-2000 |
| Ciclos de vida | Indefinido | 500-10000 |
| Vida útil | 20 | 5-10 |
| Comentarios del ciclo de vida. | Vida casi indefinida con un buen mantenimiento | La vida útil varía según la profundidad de descarga y otras aplicaciones |
| Costo por kWh | \$ 200-150000 | \$ 200-4000 |
| Impacto ambiental | Bajo | Alto/medio |
| Ventajas | Respuesta muy rápida, alta potencia específica, larga vida | Usos flexibles, respuesta muy rápida y alto poder específico |
| Desventajas | Baja densidad de energía | Problemas de seguridad, baja profundidad de descarga, corrosión, autodescarga y pérdida de eficiencia con el tiempo |

Fuente: (Sanz 2021)

Como se observa en la Tabla 3.2 existen varias tecnologías de acumulación de energía, los que se muestra en la tabla tienen la capacidad de responder de manera rápida a los requerimientos del usuario, pero con poca capacidad energía. Se aplican fundamentalmente en sistemas de almacenamiento de electricidad conectados a la red.

Los volantes de inercia son sistemas de acumulación electromecánicos. Como se muestra en la Tabla 3.2 consta de una energía específica entre 5 a 200 kilovatios de energía y una potencia de 400 a 30000 vatios según su velocidad de rotación. Con respecto al ciclo de vida es indefinido, pero tiene una vida útil aproximado de 20 años. El costo por cada kilovatio hora oscila entre los 200 a 150000 dólares dependiendo su categoría. Esta tecnología ofrece muy buenas prestaciones tales como su elevado rendimiento a (~90%), alta potencia, amplio rango de temperaturas de operación, larga vida útil y rápida respuesta. No obstante, esta modalidad sufre de una elevada razón de pérdidas alrededor de 20% por hora. Por lo que este tipo de tecnología no es adecuada para acumulación a largo plazo, sino que se lo utiliza cerca del consumo como forma de agregar inercia al sistema y compensar desbalances de manera rápida.

Las baterías de iones de litio han sido utilizadas comúnmente en electrónica móvil de consumo y vehículos eléctricos, pero han atraído la atención como posible solución de

acumulación a gran escala. Como se puede observar en la Tabla 3.2 esta tecnología consta de una energía específica de 90 a 250 kilovatios y con una potencia de 8 a 2000 vatios dependiendo el tamaño de la batería. Con respecto a los ciclos de vida son de 500 a 10000 (aunque esta varía según la profundidad de descarga y otras aplicaciones), la profundidad de descarga es cuanta energía se consume de una batería, ya que, si queda totalmente descargada, puede quedar dañada seriamente y perder gran parte de su capacidad de carga. También con una vida útil de 5 a 10 años. El costo por kilovatio hora oscila varía entre los 200 a 4000 dólares. Esta tecnología nos ofrece rápida capacidad de carga y descarga, y alta eficiencia (alrededor de 70 y 80%). No obstante, su nivel de pérdidas diarias es muy elevada, de entre 1 y 5%. Adicionalmente, es importante mantener los valores de voltaje y temperatura de estas baterías en la zona de operación segura ya que pueden ser explosivas. De ese modo, en aplicaciones a escala de red, las baterías de iones de litio son utilizadas para regulación y manejo de potencia para utilizarlas en un corto periodo de duración.

3.3.3 Almacenamiento de energía a nivel de usuario

TABLA 3.3
Comparación de tecnologías de almacenamiento a nivel de usuario.

| Tipo | Baterías de plomo-ácido | NiMH |
|--------------------------------|--|---|
| Energía específica (kW/kg) | 30-50 | 30-90 |
| Potencia específica (W/kg) | 25-415 | 50-1000 |
| Ciclos de vida | 200-2000 | 300-10000 |
| Vida útil | 10-15 | 5-10 |
| Comentarios del ciclo de vida. | La vida útil varía según la profundidad de descarga y otras aplicaciones | Permite un punto más profundo de descarga y más estable en el almacenamiento, variaciones por química |
| Costo por kWh | \$ 50-1100 | \$100-1000 |
| Impacto ambiental | Alto | Alto/medio |
| Ventajas | La vida útil varía según la profundidad de la descarga y la aplicación, variaciones según la química | Capacidad de descarga profunda, confiable, alto densidad de energía |
| Desventajas | Bajo ciclo de vida, materiales tóxicos, riesgo de inflamabilidad | Algunas variaciones tóxicas, menos poder específico que Li, alta autodescarga. |

Fuente:(Sanz 2021)

El almacenamiento de energía a nivel de usuario se basa en optimizar el uso de la energía no convencional de una vivienda. En el paso de los años no se inventado ningún tipo de almacenamiento nuevo, pero sí ha mejorado la tecnología de las baterías.

Las baterías de plomo-ácido son la tecnología de acumulación en baterías más antigua y fueron inventadas en 1859. Esta tecnología consta con una energía específica de 30 a 50 kilovatios con una potencia específica de 25 a 415 vatios. Su ciclo de vida útil es de 200 a 2000 dependiendo el tamaño de la batería, con una vida útil de 10 a 15 años (esta varía según la profundidad de la descarga y la aplicación). Con un costo por kilovatio hora entre los 50 a 1100 dólares. La eficiencia de carga-descarga es de alrededor de 75-80%. Las altas temperaturas de operación disminuyen la vida de este tipo de baterías. En cuanto a las pérdidas es bajo (menor a 0,1%) y esto hace que sean adecuadas para aplicaciones de almacenamiento a largo plazo. No obstante, sus extensos tiempos de carga, bajo número ciclos, baja densidad de energía, baja densidad de energía específica y baja densidad de potencia específica, naturaleza tóxica del ácido sulfúrico y plomo limitan el uso de este tipo de baterías a escala de red por eso el uso a nivel de usuario.

Las baterías de hidruro metálico de níquel (NiMH) son más nuevas y menos tóxicas que proporcionan una mejor energía y potencia en comparación con las baterías de plomo ácido. La energía específica que nos brindan estas baterías está en un rango de 30 a 90 kilovatios con una potencia específica entre 50 a 1000 vatios. También cuenta con un ciclo de vida de 300 a 10000 y con una vida útil de 5 a 10 años (tiene un mayor punto de profundidad de descarga con respecto a las baterías de plomo-ácido). Con un costo por kilovatio hora entre los 100 a 1000 dólares. Son muy confiables, tienen alta densidad de energía y funcionan en una variedad más amplia de condiciones de temperatura. No obstante, tiene variaciones tóxicas y las pérdidas son mayores que las de plomo-ácido y niveles de descarga por lo que son idóneas para utilizarlas a nivel de usuario.

3.4 Aplicación de la tecnología

Existen muchas aplicaciones para los sistemas de almacenamiento de energía, entre las más conocidas la acumulación por bombeo de agua, el almacenamiento térmico, la acumulación de energía a partir de la generación eólica, para comunidades o pequeñas industrias. También destaca los acumuladores integrados a energía fotovoltaica, sistemas de almacenamiento para vehículos eléctricos, baterías para uso residencial que disminuya el valor de la facturación, baterías para la regulación de frecuencia y calidad del suministro, sistemas que evitan la interrupción o la mala calidad del suministro entre otras.

A continuación, se detalla las tecnologías más convenientes a utilizar en el país dependiendo las fuentes de generación que existen o existirán en un futuro.

3.4.1 Almacenamiento hidráulico bombeado

Al contar el país con grandes afluentes de agua y ser la generación hidroeléctrica la principal, el almacenamiento de energía por bombeo es una muy buena opción para utilizarla en el Ecuador. No obstante, de la misma manera que en una hidroeléctrica convencional la selección del sitio es clave, también lo es en para la acumulación por bombeo, donde se buscan sitios en que sea posible construir dos reservas de agua a diferente nivel. El mejor sitio será aquel que presente el mayor salto con la menor distancia entre reservas, es decir lugares con desniveles abruptos. Existen dos tipos de centrales de acumulación, las que utilizan turbomáquinas reversibles y las que utilizan bombas y turbinas por separado. Según las características del sitio seleccionado la conveniencia. Si bien la mayoría de las centrales de acumulación están ubicadas en sitios de saltos elevados y medios (mayores a 130 m aproximadamente), en la actualidad también se están realizando aprovechamientos de saltos bajos con máquinas axiales. Las bombas axiales también se conocen como bombas de hélice, la presurización de las bombas axiales no se genera por el efecto de la fuerza centrífuga, sino por el principio aerodinámico en el álabe de la hélice.

En conclusión, tanto la generación y el almacenamiento de energía es la más utilizada en todo el mundo en términos de energía y potencia, ya que se trata de una tecnología ampliamente estudiada y comprobada, la cual tiene una gran vida útil y evita el inconveniente de la disposición química. Sin embargo, las principales limitaciones que tiene es que requiere una condición geográfica muy específica: desnivel abrupto y fuente de agua. A su vez, en general para ser rentable requiere aplicar economías de escala lo que conlleva a proyectos de gran porte, que pueden resultar de prolongada ejecución y compleja financiación.

3.4.2 Almacenamiento térmico

El almacenamiento de energía térmico es una tecnología clave que permite aplicaciones, geotérmicas, solares, industriales, y residenciales. También es una forma rentable de mejorar la flexibilidad de la red eléctrica, contribuyendo al mismo tiempo a la descarbonización del sector.

A continuación, se presentan varias opciones muy viables acerca del almacenamiento térmico que se puede utilizar en nuestro país.

3.4.2.1 SolidTES

Es un sistema de almacenamiento térmico (TES), conceptualmente basado en un conjunto de tubos (por los que pasa un fluido caloportador o HTF (*Heat Transfer Fluid*)) embebido en un bloque de material de alta capacidad calorífica, cuya composición puede variar en función de la temperatura requerida. Este sistema es capaz de funcionar con distintos tipos de HTF: sales fundidas, aceite térmico, aire, agua caliente presurizada o vapor procedente tanto de fuentes convencionales como renovables.

La siguiente Figura 3.1 es la representación de los módulos de solidTES (62KWt - 300 KWh),



Fig. 3.1 Módulos de solidTES (62KWt - 300 KWh),
Fuente: (Cade 2021)

La Figura 3.1 muestra 8 módulos de SolidTES que es una solución más económica, más compacta y de operación mucho menos compleja en comparación con otras tecnologías de almacenamiento de energía agua caliente presurizada. Claro está, que en el Ecuador aún no existe generación geotérmica para aprovechar el calor interno de la tierra, pero ya que actualmente existe el proyecto geotérmico Chachimbiro, de 50 megavatios que se encuentra en la fase de desarrollo de campo. Si el proyecto sale a flote y consigue generar los 50 megavatios previstos es una gran opción de implementar esta tecnología de acumulación de energía térmica.

3.4.2.2 Baterías de calor

Esta tecnología permite almacenar calor para hacer funcionar los procesos que funcionan con energía solar, también durante las horas en que no hay sol. De este modo, el almacenamiento térmico optimiza los costes energéticos al proporcionar calor directamente al proceso sin necesidad de conversión. Este sistema permite un mayor ahorro de combustible,

menores emisiones de CO₂ y un mayor margen de ahorro económico para las industrias. La energía solar térmica que suministra calor renovable es una solución confiable y rentable que se utiliza ampliamente en el sector industrial. La implementación de una batería de calor en su sistema permite satisfacer una gran parte de la demanda de calor con energía solar y mejorar la eficiencia de la planta.

La siguiente Figura 3.2 representa las tres etapas de funcionamiento de una batería de calor.



Figura 3.2 Funcionamiento de una batería de calor
Fuente: (ABSILICON 2021)

Como nos muestra en la Figura 3.2 las baterías de calor tienen 3 procesos a cumplir:

1. Carga: Al recibir la luz solar genera energía en forma de calor con los colectores solares.
2. Almacenamiento: La energía captada con los colectores es suministrada a los tanques de almacenamiento para uso en un tiempo más tarde.
3. Descarga: Cuando sea necesario, el calor es dado de alta para que genere electricidad.

Otra aplicación de este método es en el ámbito residencial, colocando colectores solares en el techo de las viviendas para después utilizados en sistemas domésticos de calefacción, agua caliente sanitaria y climatización de piscinas como se muestra en la Figura 3.3.



Fig. 3.3 Colector solar residencial
Fuente: (ABSILICON 2021)

Como se observa en la Figura 3.3 es un colector solar de placa plana, que es un conjunto de tubos metálicos orientados verticalmente que conducen el agua fría en paralelo. Estas tuberías se conectan mediante un tubo horizontal a la entrada de agua fría y otro tubo similar a la salida por la parte de arriba.

En conclusión, el almacenamiento térmico sobresale, ya que ha demostrado su capacidad de almacenar grandes cantidades de energía a un costo razonable, optimizando sistemas en conjunto, el mejoramiento de los sistemas y la gestionabilidad de la energía. Sin embargo, aún queda un largo camino por recorrer. Un camino que avanza con buen ritmo con los investigadores en almacenamiento de energía y que nos permitirá alcanzar el ansiado objetivo de aprovechar de la mejor manera la energía y la descarbonización total del planeta.

3.4.3 Almacenamiento Electroquímico

Es la tecnología comúnmente más utilizada en sistemas de almacenamiento conectados a redes de distribución o aisladas son las baterías debido a que son dispositivos de fácil escalabilidad e interconexión, ya que tiene características técnicas favorables en capacidad de energía almacenable, potencia de carga y descarga junto con una buena relación de masa/volumen versus energía.

A continuación, se presentan varias opciones muy viables acerca del almacenamiento electroquímico que se puede utilizar en nuestro país:

3.4.3.1 Baterías (BESA)

Es una tecnología en base a baterías de ion-litio, inversores y controladores lógicos programables que, a través de dispositivos electrónicos, algoritmos y controles, es capaz de almacenar y de liberar energía y potencia en el tiempo y la forma que lo requiera el sistema eléctrico.

Soluciones comprobadas para múltiples aplicaciones:

1. Alternativas de generación.
 - Liberación de Capacidad
 - Regulación de Frecuencia/Serv. Auxiliares
 - Potencia Pico Flexible
 - Integración con Energías Renovables
2. Alternativas en T&D
 - Liberación de Capacidad
 - Alivio de Congestionamientos Temporales / Mitigación de Subsistemas
3. Comercial e Industrial
 - Administrar y Disminuir su demanda de potencia de punta

A continuación, se muestra en la Figura 3.4 un sistema de almacenamiento de baterías instalado.



Figura 3.4 Sistema de almacenamiento de baterías (BESA)
Fuente:(Villalobos 2020)

Como se observa en la Figura 3.4 es un sistema de almacenamiento de energía instalado utilizando baterías que equivalen aproximadamente al 3% de la capacidad instalada de generación para la unidad de AES, tiene una autonomía de regulación de 30 minutos, y está diseñado de forma modular de 4 núcleos de 2.5MW cada uno y la posibilidad de aumentar la capacidad del sistema.

Este sistema tiene múltiples aplicaciones y se lo puede implementar tanto con generación eólica como solar con capacidades de energía muy grandes, también en la industria con bloques de baterías más reducidos y claro está en una residencia donde cuente con algún sistema de generación de energía y se necesite acumular energía cuando no se esté utilizando para cuando sea requerida utilizarla o incorporarla a la red.

3.4.3.2 Powerpack

Almacenamiento de potencia de una de las empresas más reconocidas a nivel mundial como lo es TESLA. El Powerpack está diseñado para brindar almacenamiento de energía para empresas y compañías de servicios públicos. Tiene un sistema de batería con tecnología de punta, diseñado para ser eficiente y de vida prolongada. Su disposición es modular, flexible e infinitamente escalable. Una solución completamente integrada y conectada con potencia CA con todo lo que se necesita.

El Powerpack tiene una gran cantidad de aplicaciones que ofrecen a los clientes comerciales y proveedores de energía un mayor control, eficiencia y confiabilidad en todo el suministro eléctrico.

La siguiente Figura 3.5 se muestra todos los componentes internos de un Powerpack.



Figura 3.5 Parte interna de un Powerpack
Fuente: (TESLA 2021)

En Figura 3.5 se observa un powebank con 16 baterías individuales de batería, cada una con un convertidor aislado CC-CC. La arquitectura de las unidades de batería y los dispositivos electrónicos incorporados optimizan el rendimiento en todo el arreglo y permiten hacer conmutaciones fácilmente en cualquier momento.

Aplicaciones

El Powerpack admite una gran cantidad de aplicaciones que ofrecen a los clientes comerciales y proveedores de energía un mayor control, eficiencia y confiabilidad en toda la red eléctrica.

1. Consumo inteligente de energía
 - Nivelación de picos, Conmutación de cargas, Respaldo de emergencia, Respuesta a la demanda
2. Microred
 - Construye una red localizada que pueda desconectarse de la red principal para operar de forma independiente y así reforzar su resiliencia.
3. Producción de energía
 - Integración de renovables: Uniformiza y reafirma la producción de una fuente de energía renovable como la eólica o la solar.
 - Reserva de capacidad: Suministrar capacidad de potencia y energía a la red como un activo autónomo.

3.4.3.3 CATL

Es una empresa extranjera que realiza baterías para vehículos híbridos, con una rápida innovación interactiva de materiales, un diseño de producto simplificado y un proceso de fabricación en constante mejora, CATL ha logrado avances significativos en la densidad de energía del sistema y el alcance ultra largo para facilitar la experiencia de conducción.

La tecnología integrada altamente eficiente con un sistema químico estable equilibra el rendimiento del producto y los beneficios económicos al ofrecer un kilometraje de 400 a 600 km, que es suficiente para cumplir con los requisitos de operación diarios.

A continuación, en la Figura 3.6 se muestran las distintas aplicaciones que tiene las baterías CATL en el sector automotriz.



Figura 3.6 Tipos de vehículos donde aplicar la tecnología CATL
Fuente: (CATL 2022)

Esta tecnología es muy versátil y se puede ajustar a los distintos requerimientos que desee el cliente, Como se muestra en la Figura 3.6 se puede utilizar en: Soluciones para embarcaciones, vehículos de dos ruedas, maquinaria de construcción, transporte pesado y el transporte de Pasajeros.

En conclusión, el almacenamiento electroquímico de energía es de gran ayuda para todas las etapas de un sistema eléctrico, desde la generación que ayuda a regular frecuencias, liberar carga e integra a las energías renovables. En la transmisión y distribución de energía alivia las congestiones temporales de Subsistemas. A nivel industrial administra y disminuye la demanda de potencia de punta.

Cuenta con una gran variedad de presentaciones, tamaño, costo, y materiales utilizados. Por lo que es necesario tener en cuenta para que caso en concreto se va a utilizar, para así elegir la adecuada dependiendo el proyecto que se realice. No obstante, si se realizan proyectos pequeños para almacenar energía en casa o proyectos más grandes, las regulaciones del país para suministrar energía a la red cuando el usuario no la necesite no son muy viables para generar un beneficio. Pero como la tecnología avanza cada día, los precios las baterías en general se irán reduciendo poco a poco su costo, la capacidad de carga será mayor y con menores pérdidas es ahí cuando es muy viable tener un sistema de generación y almacenamiento de electricidad.

3.5 Comparación de tecnologías de almacenamiento de energía que se pueden utilizar en el Ecuador

TABLA 3.4
Comparación de tecnologías de almacenamiento de energía.

| Almacenamiento | Tipo | Sistema de generación | Nivel | Potencia Nominal (MW) | Ventajas | Desventajas |
|----------------------------|---------------------------------|--------------------------|---|-----------------------|--|---|
| Hidráulico bombeado | Turbomáquinas reversibles | Hidroeléctrica | A gran escala | 100-5000 | -Madurez tecnológica. -Costos de operación y mantenimiento bajos. -Larga vida útil. | -Restricciones impuestas por limitaciones geográficas. - Limitaciones impuestas por los tiempos de arranque y de transición entre regímenes de funcionamiento. -Inversión inicial muy elevada |
| | Bombas y turbinas | Hidroeléctrica | A gran escala | | | |
| Térmico | SolidTES | Geotérmica Termosolar | A gran escala Mediana escala | 0.1-300 | Posibilidad de combinar sistemas de almacenamiento basados en calor sensible con bombas de calor | -Costos de inversión altos difíciles de recuperar. -Baja densidad energética. -Gran pérdida de calor a lo largo del tiempo |
| | Baterías de Calor | Termosolar | Mediana escala | | | |
| | Baterías de Calor (residencial) | Termosolar | Nivel de usuario | | | |
| Electroquímico | Baterías (Besa) | Solar Eólica | A gran escala Mediana escala | 0-40 | Buen almacenamiento. -Buena configurabilidad. | -Altos costos de inversión. -Ciclo de vida dependiente de la temperatura. |
| | Powerpack | Solar Eólica | A gran escala Mediana escala Nivel de usuario | | | |
| | CATL | Recargables | Mediana escala Nivel de usuario | | | |

Fuente: (Autor)

Con respecto a la Tabla 3.4 el almacenamiento hidráulico bombeado es el sistema de almacenamiento masivo de energía con el menor costo de almacenamiento. Es la tecnología más madura, tiene buen rendimiento, requiere poco mantenimiento y tiene una larga vida útil.

Por el contrario, esta instalación de almacenamiento tiene restricciones de ubicación y se requiere un gran capital inicial para construir la instalación. En Ecuador es uno de los más utilizados.

El almacenamiento térmico energía se puede utilizar en grande o pequeña escala en los edificios. Se complementa muy bien la energía solar térmica y se utiliza en procesos combinados de calor y electricidad, aire acondicionado y calefacción. Los materiales están disponibles para aplicaciones específicas, tiene alto rendimiento y alta ciclos de vida con capacidad de almacenamiento a largo plazo. Sin embargo, las pérdidas son variables en función de la temperatura de trabajo y aumentan a medida que aumenta esta

El almacenamiento electroquímico en todas sus presentaciones las baterías son el sistema de almacenamiento de energía más utilizado. Por sus propiedades, desarrollo, rendimiento y costo, es el método más atractivo de almacenamiento de energía (especialmente a pequeña escala). La capacidad de recargar las baterías es su factor más atractivo, incluso con alta densidad de potencia, alta descarga de corriente y buen funcionamiento a baja temperatura. Hay dos tipos de baterías que posiblemente sean las más utilizadas, comercializadas y desarrolladas: las baterías de ácido de plomo y las baterías de iones de litio, con posibles aplicaciones que abarcan todo el espectro de posibilidades de almacenamiento. Las baterías de ácido de plomo se utilizan ampliamente en el almacenamiento solar y en vehículos debido a su bajo costo, alta disponibilidad, alta reciclabilidad y capacidad para generar altas corrientes de descarga. Por otro lado, las baterías de iones de litio son líderes en el mercado de aplicaciones móviles, tanto de dispositivos electrónicos como de movilidad eléctrica gracias al vehículo eléctrico, pero también en aplicaciones estacionarias poco a poco va ganando terreno, como demuestran los Powerpack. debido a su alta energía específica, alta potencia y baja autodescarga, aunque tienen un precio elevado en comparación con el antecesor.

3.6 Tecnología de almacenamiento más viable para utilizar en el Ecuador

Almacenamiento hidráulico por bombeo

Es una hidroeléctrica la cual posee dos embalses. El agua contenida en el embalse inferior es bombeada al embalse situado en la parte más alta, con el fin de reutilizarla para la generación de energía eléctrica. Este tipo de centrales produce energía durante las horas puntas del consumo, es decir, las de mayor demanda, funcionando como una central hidroeléctrica convencional. Después, durante las horas valle, que son las de menor demanda, se bombea el agua que ha quedado almacenada en el embalse superior.

En la actualidad el 92% de la generación de energía en el país proviene de centrales hidráulicas lo que es un gran recurso que se debe aprovechar. Pero debido a la configuración de cada una de ellas, es muy difícil adaptarlas a el almacenamiento hidraulico bombeado. Existen 3 tipos de centrales hidroeléctrica como son: de paso, con embalse de reserva y reversibles o de bombeo. Está última no existente aún en el Ecuador.

Hidroeléctrica de paso

Son aquellas cuyo funcionamiento es continuo pero variable a lo largo del año, ya que se adaptan en todo momento al régimen de caudales del río sin alterarlo. Las centrales de este tipo que tiene el Ecuador se detallan en la Tabla 3.5

TABLA 3.5
Hidroeléctricas tipo pasada

| Hidroeléctricas | Ubicación | Tipo | Potencia nominal (MW) | Potencia efectiva (MW) |
|----------------------------|---------------------------------|--------|-----------------------|------------------------|
| Coca codo Sinclair | Napo- El Chaco | Pasada | 1.500,00 | 1.476,00 |
| Sopladora | Azuay- Sevilla de Oro | Pasada | 487,00 | 486,00 |
| Minas san Francisco | Azuay- Pucara | Pasada | 275,50 | 274,50 |
| San Francisco | Tungurahua- Baños de Agua Santa | Pasada | 230,00 | 212,00 |
| Delsitanisagua | Zamora Chinchipe- Zamora | Pasada | 180,00 | 180,00 |
| Manduriacu | Imbabura- Cotacachi | Pasada | 65,00 | 63,36 |
| Hidrosanbartolo | Morona Santiago- Santiago | Pasada | 49,98 | 49,95 |
| Due | Sucumbíos- Gonzalo Pizarro | Pasada | 49,71 | 49,71 |
| Normandia | Morona Santiago- Morona | Pasada | 49,58 | 49,58 |
| Cumbayá | Pichincha- DMQ | Pasada | 40,00 | 40,00 |
| Pusuno | Napo- Tena | Pasada | 38,25 | 38,25 |
| Abanico | Morona Santiago- Morona | Pasada | 38,45 | 37,99 |
| Topo | Tungurahua- Baños de Agua Santa | Pasada | 29,20 | 27,00 |
| Ocaña | Cañar- Cañar | Pasada | 26,10 | 26,10 |

Fuente:(CELEC 2021b)

En este tipo de hidroeléctricas es muy difícil implementar la acumulación de energía por bombeado debido a su alto presupuesto que conlleva construir por completo embalses, sistema de bombeado y la infraestructura civil.

Hidroeléctricas con embalse de reserva

Son sistemas donde es posible almacenar el agua a través de un reservorio aguas arriba de la central, lo que permite regular la operación y así satisfacer las necesidades de gestión

de la demanda. Dependiendo de la capacidad del embalse, el control puede ser estacional o anual. Las centrales de este tipo que tiene el Ecuador se detallan en la Tabla 3.6

TABLA 3.6 Hidroeléctricas tipo embalse de reserva

| Hidroeléctricas | Ubicación | Tipo | Potencia nominal (MW) | Potencia efectiva (MW) |
|-----------------------|---------------------------------|---------|--------------------------|---------------------------|
| Paute | Azuay- Sevilla de Oro | Embalse | 1.100,00 | 1.075,00 |
| Mazár | Azuay- Sevilla de Oro | Embalse | 170,00 | 170,00 |
| Agoyán | Tungurahua- Baños de Agua Santa | Embalse | 160,00 | 156,00 |
| Pucará | Tungurahua- Pillaro | Embalse | 73,00 | 73,00 |
| Marcel Laniado | Guayas- El Empalme | Embalse | 213,00 | 213,00 |
| Baba | Los Ríos- Buena Fe | Embalse | 42,20 | 42,00 |

Fuente:(CELEC 2021b)

En este tipo de centrales con embalse de reserva es más viable la adaptación de un sistema de almacenamiento de energía por bombeo ya que cuenta con un represa en la parte superior de las turbinas de generación y en la parte inferior sigue su cause natural. Los costos de implementación para este tipo de centrales se reduce mucho ya que se necesita la construcción de un embalse en la parte inferior de la central, la adaptación de un sistema de bombeo y las obras civiles que esto conlleva. Pero depende de varios factores técnicos para que sea factible implementar el sistema de almacenamiento por bombeado.

Hidroeléctricas reversibles o de bombeo

En este caso, además de generar energía limpia, permiten acumular energía eléctrica bombeando agua al embalse superior.

Esta tecnología está muy desarrollada y se utiliza en varios países del mundo pero aún no se a implentado en el Ecuador y al tener un recurso hídrico muy abundante se debe aprovechar de mejor manera.

Las centrales hidroeléctricas como Agoyán, Marcel Linado y Baba tienen un gran potencial para implementarles el almacenamiento hidraulico por bombeo debido a su estructura de contrucción que son grandes represas únicas y no estan distribuidas en tipo cascada como lo son las centrales de Mazár y Paute.

En las 3 hidroeléctricas ya mencionadas se puede implementar un bombeo mixto con la construcción de embalses en la parte inferior y el sistema de bombeo. Donde se puede generar energía eléctrica sin necesidad de bombeo previo, ya que el río vierte su corriente en el embalse superior y continúa a el embalse inferior. De esta forma, cuando hay un exedente de agua, el sistema actúa como un sistema de control y cuando se necesita almacenar energía, se bombea agua del embalse inferior al superior.

Esta tecnología consta de 2 embalses situados a diferentes alturas y subterranos conectados por una sala de máquinas que alberga el grupo turbina/generador. Por lo tanto, la energía potencial del agua situada en el embalse superior, se aprovecha y se dirige hacia el depósito inferior para generar energía durante las horas pico. Mientras que durante las horas valle, se bombea agua en sentido contrario, recuperando así parte de la energía almacenada.

Para determinar si se puede establecer el almacenamiento por bombeo se debe tener en cuenta los siguientes principios básicos:

- **Identificación preliminar del sitio**

El mejor sitio será aquel que presente el mayor salto con la menor distancia entre reservas, es decir lugares con desniveles abruptos.

- **Estimación preliminar de potencia, caudal y eficiencia**

Es necesario determinar el caudal total y el rendimiento de las máquinas.

- **Pérdidas por evaporación**

Debido a la evaporación de una parte de la masa de agua almacenada, se perderá a la atmósfera por lo que se debe reponer

- **Turbinas**

Las turbinas hidráulicas pueden ser clasificadas según dos categorías: de acción y de reacción.

Acción: se encuentran el tipo Pelton y Michel-Banki, que son caracterizadas por su bajo costo de fabricación. Este tipo de turbinas generalmente son utilizadas en aplicaciones de saltos elevados (mayores a 200 m) y caudales bajos.

Reacción: se encuentran el tipo Francis, las de flujo mixto y las Kaplan. Las Francis son utilizadas en aplicaciones de mayores saltos que las Kaplan, mientras que las de flujo mixto suelen utilizarse en casos intermedios.

- **Máquinas reversibles: turbinas-bomba**

Las turbinas-bomba de velocidad variable y los sistemas ternarios ofrecen flexibilidad adicional a la red permitiendo la regulación de potencia y seguimiento de carga cuando se bombea.

En consecuencia el almacenamiento de energía por bombeo de agua es una energía renovable con gran disponibilidad, ya que se trata de un recurso inagotable siempre que el ciclo del agua perdure. Es autóctona, evitando de esta forma importaciones del exterior, dando cobertura las horas puntas de demanda, y además, desde el punto de vista ambiental no genera calor ni emisiones contaminantes.

Las desventajas que presenta este sistema de almacenamiento de energía son, por un lado, el hecho de que requiere unas condiciones de emplazamiento específicas, siendo la más importante la disponibilidad de lugares técnicamente adecuados con acceso al agua. Por otro lado, cabe mencionar el alto coste de capital y los problemas medioambientales

Conclusiones

- Este trabajo da una visión general de las diferentes tecnologías de almacenamiento que actualmente están disponibles. Se abordaron varios tipos de almacenamiento de energía y se dividieron en 4 grupos tales como: almacenamiento mecánico, eléctrico, térmico y electroquímico. En general, se puede concluir de esta investigación que todas las tecnologías de almacenamiento son viables, pero bajo ciertas condiciones, según la demanda instantánea de energía, costos y capacidad de almacenamiento. Actualmente no existe una tecnología de almacenamiento ideal para cada tipo de aplicación que pueda ser superior a otras, ya que se deben considerar varios factores, cuestiones técnicas para seleccionar un tipo de almacenamiento en particular.
- Ecuador tiene un enorme potencial de energías renovables sin explotar, pero es necesario la diversificación de la matriz energética debido al paulatino agotamiento de las reservas de petróleo. La matriz energética ecuatoriana tiene una dependencia de combustibles fósiles mayor al 90% que es desmesurado, teniendo en cuenta que existen varios tipos de recursos con los que se puede generar energía limpia. Si bien es cierto la mayor fuente de generación de energía es la hidroeléctrica, las otras fuentes de energía como la térmica, solar y eólica no han tenido un crecimiento considerable en los últimos años, por lo que se debe poner más énfasis en investigarlas. No obstante, existen barreras que dificultan el desarrollo y aprovechamiento de las energías renovables no convencionales como la poca información disponible a nivel local, los aranceles de importación de equipos, la infraestructura para su posible interconexión, las fuentes de financiamiento y la escasez de talento humano calificado. Por lo que es necesario que el estado incentive la investigación y desarrollo de las fuentes de energía renovables en nuestro país.
- La expansión de la generación renovable variable ha creado la necesidad de aumentar la flexibilidad de los sistemas de energía eléctrica, y la acumulación de energía es una forma de lograrlo. Actualmente existen varios sistemas de almacenamiento de energía, algunos en etapas avanzadas de desarrollo, otros aún en etapa de investigación. Se evidencia que los sistemas de almacenamiento ayudan a mitigar la congestión de las redes de transmisión y mejora el balance entre la demanda y el consumo, permitiendo almacenar en las horas de poca demanda y entregando a la red en las horas pico. Realmente, todas las diferentes opciones de almacenamiento energético son válidas para la generación de energía, pero será necesario tener en cuenta su viabilidad, tanto tecnológica como económica.

Recomendaciones

- Con la finalidad de ampliar el estudio en un futuro se podría considerar un estudio individual de cada una de las tecnologías de almacenamiento, ya que todas las tecnologías mencionadas son recomendadas pero cada una tiene su forma de aplicar, adaptación y costo con respecto a cada fuente de generación.
- Se recomienda realizar un análisis enfocado en las *Smart Grids*, ya que es evidente que existe la necesidad de una reestructuración del sistema eléctrico de generación, transmisión, distribución y consumo, para no depender solo de la generación hidroeléctrica si no adaptarnos a los nuevos sistemas automáticos inteligentes, que permitan el uso eficiente de la energía eléctrica, aprovechando toda la energía que se genera, almacenándola cuando se tenga excedentes y suministrándola a la red a través de una comunicación bidireccional entre el consumidor y el ente distribuidor de energía.

Bibliografía

- ABSILICON. 2021. "Baterías de Calor." Retrieved June 8, 2022 (<https://www.absilicon.com/es/energia-solar-termica/almacenamiento-de-energia-termica/>).
- Alzamora, P. 2015. "Operación de Embalses En Condiciones de Hidrología Crítica." *Revista Técnica "Energía"* 7(1):17–25. doi: 10.37116/revistaenergia.v7.n1.2011.202.
- Alzola, Rafael Peña, and Rafael Sebastián Fernández. 2018. "BATERÍAS ELECTROMECAÑICAS: VOLANTES DE INERCIA PARA EL ALMACENAMIENTO TEMPORAL DE ENERGÍA." Retrieved March 17, 2021 (<https://web.a.ebscohost.com/abstract?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=00127361&AN=34659954&h=L955%2Bc8BewX7X9DKIYM%2Bf44SZt2fT2iL81f90gs4weys3ZEdkmm1%2Bmdtl6DWqNTZ0kp4k6Es8UXpVzjHkaxGZg%3D%3D&crl=c&resultNs=AdminWebAuth&resultLoc>).
- ARC. 2021. "Panorama Eléctrico." *Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables*, 39.
- Arconel. 2021. "Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables."
- Arribas, Enrique, Maria Jose Camarasa, Mariana Gordaliza, Carlos Puig, and Jordi Quintana. 2014. "Pilas de Combustible." *Alambique: Didáctica de Las Ciencias Experimentales* 102(27):115–18.
- Artinostic, Sciacovelli, Wang Chen, and Garvery Shasha. 2017. "Dynamic Simulation of Adiabatic Compressed Air Energy Storage (A-CAES) Plant with Integrated Thermal Storage." doi: *Energía aplicada*; 2017; 185: 16-28.
- Asensio, Paloma, Luis Antonio Cano Rodriguez, Maria Esther Guervós Sánchez, and Universidad Nacional del Nordeste - Argentina. 2011. "Hidrógeno y Pila de Combustible." *Fundación de La Energía de La Comunidad de Madrid* 16.
- Barragán, E. A. 2015. "Generación Eólica En Ecuador: Análisis Del Entorno y Perspectivas de Desarrollo." *Cuestiones Económicas* 1(1):56; QUITO-ECUADOR. doi: 10.37116/revistaenergia.v10.n1.2014.100.
- Bertran, Jaume Martínez. 2017. "Métodos de Estimación Del Estado de Carga de Baterías Electroquímicas." Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona.
- Bohlen, Oliver, Julia Kowal, and Dirk Uwe Sauer. 2017. "Ageing Behaviour of Electrochemical Double Layer Capacitors. Part I. Experimental Study and Ageing Model." *Journal of Power Sources* 172(1):468–75. doi: 10.1016/j.jpowsour.2007.07.021.
- Burga, Ivette, and Katerine Dueñas. 2020. "Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo Contenido."
- Caballero, Alvaro. 2016. "SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES NANOMÉTRICOS PARA SU APLICACIÓN EN BATERÍAS RECARGABLES DE IÓN-LITIO Y PLOMO-ÁCIDO." Universidad de Córdoba.

- Cabeza, Luisa, Ana Inés Fernández Renna, Dieter Boer, Carles Mateu, Mercè Segarra Rubí, and Manel Vallès. 2019. "Análisis De Las Tecnologías De Almacenamiento De Energía Térmica Dentro De La Economía Circular." *Centro Azúcar* 46(5):7–12.
- Cade. 2021. "Sistema de Almacenamiento de Energía Térmica En Hormigón." *Sistema de Almacenamiento de Energía Térmica En Hormigón*. Retrieved (<https://n9.cl/bdh01>).
- Catalão, João P. S., and A. W. Bizuayehu. 2017. "Electrical Energy Storage Systems: Technologies' State-of-the-Art, Techno-Economic Benefits and Applications Analysis." *Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences* 2295–2304. doi: 10.1109/HICSS.2014.290.
- CATL. 2022. "Electric Private Vehicle Solutionse." Retrieved June 18, 2022 (<https://www.catl.com/en/solution/passengerEV/>).
- CELEC, EP. 2019. "MANABÍ TENDRÁ LA CENTRAL DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA MÁS GRANDE DEL PAÍS." *03 de Septiembre de 2019*. Retrieved (<https://www.celec.gob.ec/enerjubones/index.php/sala-prensa/noticias/123-manabi-tendra-la-central-de-energia-fotovoltaica-mas-grande-del-pais>).
- CELEC, EP. 2021a. "CENTRAL EÓLICA VILLONACO." Retrieved (<https://www.celec.gob.ec/gensur/index.php/84-central-eolica-villonaco-la-de-mayor-produccion-por-turbina-en-el-mundo>).
- CELEC, EP. 2021b. "CENTRALES HIDROELÉCTRICAS DEL ECUADOR." Retrieved October 28, 2022 (<https://observatorioelc.ister.edu.ec/2021/04/26/centrales-hidroelectricas-del-ecuador/>).
- CELEC, EP. 2021c. "Corporacion Electrica Del Ecuador." Retrieved (<https://www.celec.gob.ec>).
- Chen, Haisheng, Thang Ngoc Cong, and Wei Yang. 2015. "Progress in Electrical Energy Storage System: A Critical Review." *Progress in Natural Science* 19(3):291–312. doi: 10.1016/j.pnsc.2008.07.014.
- Coronel, Diego Tamatia. 2017. "Modelo Para Análisis de Viabilidad de Arbitraje Energético Con Baterías de Flujo de Vanadio Bajo Incertidumbre Diego Tamatia Coronel Bejarano." *Universidad Naciolal de Asunción*.
- Del Corte Revuelta, Javier. 2019. "Análisis Almacenamiento de Energía de Aire Comprimido." Universidad de Zaragoza.
- Cueva, Eduardo, Juan Lucero, and Alex Guzman. 2018. "Revisión Del Estado Del Arte de Baterías Para Aplicaciones Automotrices." *Enfoque UTE* 9(1):166–76. doi: 10.29019/enfoqueute.v9n1.202.
- Díez Olleros, Iñigo. 2018. "TECNOLOGIA DE LOS VOLANTES DE INERCIA." ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS Y ENERGÍA.
- Dunn, Bruce, Haresh Kamath, and Jean Marie Tarascon. 2016. "Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices." *Science* 334(6058):928–35. doi: 10.1126/science.1212741.

- Escobar Mejia, Andres. 2015. "Energy Storage Systems in Renewable Power Generation." *Scientia Et Technica XVII* (47):12–16.
- Ferreira, Helder Lopes, Raquel Garde, and Gianluca Fulli. 2016. "Characterisation of Electrical Energy Storage Technologies." *Energy* 53:288–98. doi: 10.1016/j.energy.2013.02.037.
- Fonseca, Jaime Hamel. 2015. "CELDAS, PILAS Y BATERÍAS DE ION- LITIO UNA ALTERNATIVA PARA....???" *Journal Boliviano de Ciencias* 8:41–48.
- Fox, B. 2012. "Sistemas de Almacenamiento Óptico." *World Patent Information* 9(4):270. doi: 10.1016/0172-2190(87)90121-9.
- García, Alberto. 2017. "Tecnologías de Almacenamiento de Energía En La Red Eléctrica." *Universidad De Cantabria* 1–93.
- García, Enrique, and Quismondo Hernaiz. 2010. "DESARROLLO DE BATERÍAS PLOMO – ÁCIDO." UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID.
- Gómez, Jhonnatan, Jairo D. Murcia, and Ivan Cabeza. 2017. "La Energía Solar Fotovoltaica En Colombia: Potenciales, Antecedentes y Perspectivas." *Universidad Santo Tomás* 1–19.
- González, Jerson, Carlos Roldán, Dagoberto Arias, Juan Carlos Valverde, and Diego Camacho. 2018. "Evaluación Financiera de Generación Eléctrica de 2 MW a Partir de Biomasa Forestal En Costa Rica." *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* 15:35–42. doi: 10.18845/rfmk.v15i1.3709.
- Guacaneme, Javier A., David Velasco, and César L. Trujillo. 2014. "Revisión de Las Características de Sistemas de Almacenamiento de Energía Para Aplicaciones En Micro Redes." *Informacion Tecnologica* 25(2):175–88. doi: 10.4067/S0718-07642014000200020.
- Hernandez, Alexander Arias. 2016. "EFECTO DE LOS VOLANTES DE INERCIA EN LA ESTABILIDAD TRANSITORIA DE SISTEMAS ELECTRICOS." UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA Programa.
- IBERDROLA. 2021. "CENTRAL HIDROELECTRICA DE BOMBEO." Retrieved August 11, 2021 (<https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/central-hidroelectrica-bombear#:~:text=CÓMO FUNCIONA UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE BOMBEO&text=Este tipo de central eléctrica,satisfacer toda la demanda eléctrica.>).
- Jansen, Ralph H., and Timothy P. Dever. 2014. "G2 Flywheel Module Design." *Collection of Technical Papers - 2nd International Energy Conversion Engineering Conference* 2(August):683–95. doi: 10.2514/6.2004-5603.
- Lascano, Diego. 2019. "Proyecto de Una Aplicación HEMS Para La Gestión de Energía de Hogares Con Generación de Energía Fotovoltaica Situados En Ecuador." *Ayaz* 8(5):55.
- Lin, Zifeng, Pierre Louis Taberna, and Patrice Simon. 2017. "Electrochemical Double Layer Capacitors: What Is next beyond the Corner?" *Current Opinion in Electrochemistry* 6(1):115–19. doi: 10.1016/j.coelec.2017.10.013.

- Lizana, Jesús, Ricardo Chacartegui, Ángela Barrios-Padura, and José Manuel Valverde. 2017. "Caracterización de Materiales de Almacenamiento de Energía Térmica Para Aplicaciones En Edificación." *3er Congreso Internacional de Construcción Sostenible y Soluciones Eco-Eficientes* 221–637.
- Lladó, Adria. 2015. "Compressed Air Energy Storage Turbo-Machinery." *American Society of Mechanical Engineers (Paper)* (78-GT-97):1–64.
- Llive Guerrero, Hector Leonardo. 2019. "PLANIFICACIÓN DE LA OPERACIÓN ENERGÉTICA DE CENTRALES HIDROELÉCTRICAS MULTIPROPÓSITO DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO CONSIDERANDO LA METODOLOGÍA DE CURVAS GUÍAS DE LOS EMBALSES." Escuela politécnica nacional.
- Manrique, Alejandro. 2016. *Explotación Del Litio, Producción y Comercialización de Baterías de Litio En Argentina*. Vol. 18.
- Manwell, James F., and G. Jon. 2013. "LEAD ACID BATTERY STORAGE MODEL FOR HYBRID ENERGY SYSTEMS." 50(5):399–405.
- Marín, Enrique. 2017. "Análisis de Estrategias de Despacho de Una Central Fotovoltaica Con Almacenamiento a Través de Bombeo Hidráulico Con Agua de Mar."
- MAXWELL T. 2019. "SUPERCAPACITORS." Retrieved (<https://maxwell.com/products/ultracapacitors/>).
- MEER. 2019. "Atlas Eólico Del Ecuador." *Atlas Eolico Del Ecuador Con Fines de Generacion Eolica* 1:56.
- Mendoza, Diana Sofía, Javier Solano, and Rodrigo Correa. 2020. "Modelo de Operador Fraccional Para Describir La Dinámica de Lossupercondensadores." *Revista UIS Ingenierías*, 79–86.
- MERNNR. 2020. "Plan Maestro de Electricidad 2019-2027." *MERNNR Ministerio de Energía y Recursos No Renovables* Ministerio de Energía y Recursos No Renovables 390.
- Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables. 2021. "CENTRAL HIDROELÉCTRICA 'COCA CODO SINCLAIR.'" Retrieved (<https://www.recursoyenergia.gob.ec/central-hidroelectrica-coca-codo-sinclair/>).
- Mírez, Jorge. 2016. "Sistemas de Almacenamiento Energético." *Investigación y Ciencia* (432):70–77.
- Molina Sanchez, Ferney Sadid, Sergio Jair Pérez Sichacá, and Sergio Raul Rivera Rodriguez. 2017. "Formulación de Funciones de Costo de Incertidumbre En Pequeñas Centrales Hidroeléctricas Dentro de Una Microgrid." *Ingenierías USBMed* 8(1):29–36. doi: 10.21500/20275846.2683.
- Morales, Sergio, Laura Corredor, Julio Paba, and Leonardo Pacheco. 2014. "Etapas de Desarrollo de Un Proyecto de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas: Contexto y Criterios Básicos de Implementacion." *DYNA (Colombia)* 81(184):178–85. doi: 10.15446/dyna.v81n184.39757.
- Moratilla Soria, Beatriz. 2016. "La Energía Eólica." *Dyna* 81(1):21–25.

- Muños, Belen. 2017. "Nanofluids Based on Molten Nitrates for Thermal Energy Storage and Heat Transfer in Concentrated Solar Power." technology, Universidad del Pais Vasco.
- Muñoz Chumo, Edwin Adrián, Ney Raúl Balderramo Vélez, and Gabriel Enrique Pico Mera. 2018. "Eficiencia Energética En Función Del Desarrollo Del Plan Maestro de Electrificación (PME) En Ecuador." *Revista de Investigaciones En Energía, Medio Ambiente y Tecnología: RIEMAT ISSN: 2588-0721* 3(2):1. doi: 10.33936/riemat.v3i2.1624.
- Muñoz Diez de la Cortina, Alejandro. 2015. "ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA MEDIANTE AIRE COMPRIMIDO." Universidad de Sevilla.
- Muñoz, Jorge Patricio, Marco Vinicio Rojas, and Carlos Raúl Barreto. 2018. "INCENTIVO A LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN EL ECUADOR."
- Oliver, A., F. J. Neila, and A. García-Santos. 2012. "Clasificación y Selección de Materiales de Cambio de Fase Según Sus Características Para Su Aplicación En Sistemas de Almacenamiento de Energíatérmica." *Materiales de Construccion* 62(305):131–40. doi: 10.3989/mc.2012.58010.
- Oliver, A., F. J. Neila, and A. García. 2011. "Incorporación de Materiales de Cambio de Fase En Placas de Yeso Para Almacenamiento de Energía Térmica Mediante Calor Latente: Caracterización Térmica Del Material Mediante La Técnica DSC." *Informes de La Construccion* 63(522):61–70. doi: 10.3989/ic.09.039.
- Ortiz, Francisco. 2017. "Almacenamiento Mecánico (Volantes de Inercia)." 2–6.
- Paish, Oliver. 2012. "Small Hydro Power: Technology and Current Status." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6(6):537–56. doi: 10.1016/S1364-0321(02)00006-0.
- Párraga, German, Sney Intrago, and Evelin Velasco. 2019. "Producción de Energía Eólica En Ecuador." *Julio - Septiembre, 2019*, 22–32.
- Peláez, Manuel, and Juan Espinoza. 2015. *Estado de La Energía Geotérmica En Ecuador*.
- Peña Alzola, Rafael, and Rafael Sebastian Fernández. 2018. "Baterías Electromecánicas: Volantes de Inercia Para El Almacenamiento Temporal de Energía." *Dyna (Bilbao)* 83(7):440–44.
- Peña, Juan, Domingo Perez, Juan Carlos Ruiz, Pedro Nuñez, Belen Bellasteros, and JEsus Canales. 2017. "Investigación Química II . Pilas de Combustible de Óxidos Sólidos (SOFC)." 5–14.
- Peña, Rafael, Andres Santos, and Cesar Trujillo. 2020. "Análisis Para La Seleccion de Sistemas de Almacenamiento Basados En Baterias Para Microrredes Electricas." 284–304.
- Pérez Martinez, Marta, María José Cuesta Santianes, Sylvia Nuñez Crespi, and Juan Antonio Cabrera Jimenez. 2012. "Utilización de Biogás En Pilas de Combustible." *Prospectiva y Vigilancia Tecnológica* 1(07):68.
- Ramirez, C., A. Fernandez, M. Gomez, F. Jaramillo, and L. Cabeza. 2020. "DESARROLLO DE UN COMPOSITE ÁCIDO CÁPRICO/ÁCIDO MIRÍSTICO/SOPORTE POROSO

- PARA EL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA.” *XVII Congreso y XIII Cngreos Iberoamericano de Energia Solar* (52):1–6.
- Ramos, Maria, Marta Miranda, and Javier Serrudo. 2017. “Revista Del Desarrollo Tecnológico.” *Revista Del Desarrollo Tecnológico* 66.
- Recursosyenergia. 2019. “Chachimbiro, Imbabura, Tendrá La Primera Central de Generación Eléctrica Con Energía Geotérmica.” Retrieved (<https://www.recursosyenergia.gob.ec/chachimbiro-imbabura-tendra-la-primera-central-de-generacion-electrica-con-energia-geotermica/>).
- Remache, Abel. 2020. “Volante de Inercia: Sistemas y Materiales Aplicados En Medios de Transporte de Pasajeros.” *Ingenio* 3(1):47–70. doi: 10.29166/ingenio.v3i1.2396.
- Roca, Jose A. 2017. “Las 10 Mayores Centrales Hidroeléctricas de Bombeo Del Mundo.” *27/10/2017*.
- Roca, Roberto Norberto, and Damian Leonardo Perero. 2016. “Análisis Técnico Económico Para El Cambio de Sistema de Levantamiento Artificial de Bombeo Hidráulico a Bombeo Electrosumergible Realizado En El Campo FICT.” 205.
- Rodrigues, E. M. G., A. W. Bizuayehu, and J. Contreras. 2018. “Analysis of Electrical Energy Storage Technologies’ State-of-the-Art and Applications on Islanded Grid Systems.” *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*. doi: 10.1109/tdc.2014.6863361.
- Rodríguez, Dennis. 2020. *Evaluación De Supercondensadores Como Sistema De Almacenamiento Para Microredes*.
- Rodriguez, J. 2017. “Beneficios Del Uso De La Biomasa En Los Procesos Productivos De Cartapel: Caso Empresa Megapellets.” 11.
- Rojas, Nestor, Luvier Echeverry, and Sebastian Sierra. 2018. “Termo-Cinética de La Lixiviación de Plomo a Partir de Baterías Reciclada.” 3461. doi: 36.1.10944.
- Ruiz-Morales, J. C., H. Lincke, D. Marrero-López, J. Canales-Vázquez, and P. Núñez. 2015. “Lanthanum Chromite Materials as Potential Symmetrical Electrodes for Solid Oxide Fuel Cells.” *Boletín de La Sociedad Espanola de Ceramica y Vidrio* 46(4):218–23. doi: 10.3989/cyv.2007.v46.i4.240.
- Saldias, H., and H. Ulloa. 2012. “Evaluación Comparativa de Centrales de Generación de Energías Renovables Mediante La Aplicación de La Nueva Ley de Energías Renovables Recientemente Aprobada En Chile Integrantes:”
- Sánchez, V. G. O., and P. J. Pineda. 2020. “SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA MEDIANTE CALOR LATENTE CON ERITRITOL COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE.” *XVII Congreso y XIII Cngreos Iberoamericano de Energia Solar* 1–8.
- Sanz, Federico. 2021. “Acumulación de Energia Por Bombeo y Sus Efectos En El Sistema Eléctrico.”
- Segarra, M., A. Fernandez, and C. Berrenche. 2018. “Formación En Almacenamiento de

- Energía Térmica.” *INPATH-TES* 1–6.
- Shao, Yuanlong, Maher F. El-Kady, Jingyu Sun, Yaogang Li, Qinghong Zhang, Meifang Zhu, Hongzhi Wang, Bruce Dunn, and Richard B. Kaner. 2018. “Design and Mechanisms of Asymmetric Supercapacitors.” *Chemical Reviews* 118(18):9233–80. doi: 10.1021/acs.chemrev.8b00252.
- TESLA. 2021. “Powerpack.” Retrieved June 15, 2022 (https://www.tesla.com/es_MX/POWERPACK).
- Tiemblo, Pilar, Victor Gregorio, and Nuria Garcia. 2020. “Presente y Futuro de Los Polímeros En El Diseño de Baterías de Litio.” *Revista De Plásticos Modernos* 119(756)(June):10–16.
- Torres, Juan. 2019. “Estudio Comparativo Entre Las Diferentes Fuentes De Energia Electrica En Colombia Y La Generacion De Electricidad A Partir De Biomasa.”
- Vargas, Antonio, and Pedro Garcia. 2018. “Estudio Comparativo de Sistemas de Almacenamiento de Energía Para Media-Larga Duración En España.” *Ingeniería Química y Ambiental Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla*.
- Vasudevan, Krishnakumar R., Vigna K. Ramachandaramurthy, Gomathi Venugopal, J. B. Ekanayake, and S. K. Tiong. 2021. “Variable Speed Pumped Hydro Storage: A Review of Converters, Controls and Energy Management Strategies.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 135(January 2020):110156. doi: 10.1016/j.rser.2020.110156.
- Villalobos, Benjamin. 2020. “Almacenamiento de Energía Baterías (BESA).” 1–23.
- VOLTIUM. 2020. “Sistema de Almacenado de Aire Comprimido.” Retrieved September 11, 2020 (<https://www.voltimum.es/articulos-tecnicos/caes-sistema-almacenado-aire>).
- Wang, Jidai, Lan Ma, Kunpeng Lu, Shihong Miao, Dan Wang, and Jihong Wang. 2017. “Current Research and Development Trend of Compressed Air Energy Storage.” *Systems Science & Control Engineering* 5(1):434–48. doi: 10.1080/21642583.2017.1377645.
- Witt, Jack. 2019. “Estudio de Implementación de Sistemas de Almacenamiento de Energía Térmica En Forma de Agua Fría y Hielo Para District Cooling.” UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID MÁSTER.
- Ye, Jian Shan, Xiao Liu, Hui Fang Cui, Wei De Zhang, Fwu Shan Sheu, and Tit Meng Lim. 2015. “Electrochemical Oxidation of Multi-Walled Carbon Nanotubes and Its Application to Electrochemical Double Layer Capacitors.” *Electrochemistry Communications* 7(3):249–55. doi: 10.1016/j.elecom.2005.01.008.
- Ye, Jian Shan, Pawan Sharma, T. S. Bhatti, Xiao Liu, Hui Fang Cui, Wei De Zhang, Fwu Shan Sheu, Tit Meng Lim, Zifeng Lin, Pierre Louis Taberna, Patrice Simon, Oliver Bohlen, Julia Kowal, Dirk Uwe Sauer, D. Weingarth, H. Noh, A. Foelske-Schmitz, A. Wokaun, R. Kötz, J. H. Chen, W. Z. Li, D. Z. Wang, S. X. Yang, J. G. Wen, Z. F. Ren, Hao Hongzhi Wang, Thomas K. J. Köster, Nicole M. Trease, Julie Ségalini, Pierre Louis Taberna, Patrice Simon, Yury Gogotsi, Clare P. Grey, M. Jayalakshmi, K.

Balasubramanian, Yuanlong Shao, Maher F. El-Kady, Jingyu Sun, Yaogang Li, Qinghong Zhang, Meifang Zhu, Hao Hongzhi Wang, Bruce Dunn, Richard B. Kaner, A. G. Pandolfo, A. F. Hollenkamp, Sanliang Zhang, and Ning Pan. 2015. "Real-Time NMR Studies of Electrochemical Double-Layer Capacitors." *Journal of Power Sources* 118(1):1–19. doi: 10.1016/S0008-6223(01)00266-4.

Zhang, Sanliang, and Ning Pan. 2015. "Supercapacitors Performance Evaluation." *Advanced Energy Materials* 5(6):1–19. doi: 10.1002/aenm.201401401.