

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**ANÁLISIS TÉCNICO, REGULATORIO Y ECONÓMICO DE LA  
IMPLEMENTACIÓN DE ALMACENAMIENTO EN BATERÍAS A  
GRAN ESCALA EN EL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO.**

**ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE  
ALMACENAMIENTO EN BATERÍAS A GRAN ESCALA EN EL  
SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO.**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

**MARCELO SEBASTIAN SANTACRUZ NAVARRETE**

[marcelo.santacruz@epn.edu.ec](mailto:marcelo.santacruz@epn.edu.ec)

**DIRECTOR: Dr. GABRIEL BENJAMÍN SALAZAR YÉPEZ.**

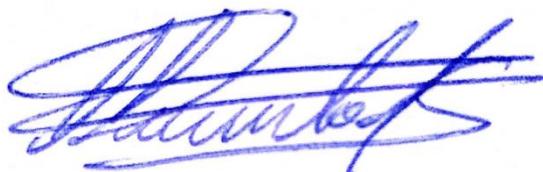
[gabriel.salazar@epn.edu.ec](mailto:gabriel.salazar@epn.edu.ec)

**DMQ, octubre 2022**



## CERTIFICACIONES

Yo, Marcelo Sebastian Santacruz Navarrete declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



---

**MARCELO SEBASTIAN SANTACRUZ NAVARRETE**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Marcelo Sebastian Santacruz Navarrete, bajo mi supervisión.



---

**GABRIEL BENJAMÍN SALAZAR YÉPEZ**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

MARCELO SEBASTIAN SANTACRUZ NAVARRETE

GABRIEL BENJAMÍN SALAZAR YÉPEZ

## **DEDICATORIA**

A mis padres quienes han sido el pilar fundamental en mi vida, que han creído en mi capacidad para desenvolverme y darme la fuerza para afrontar todos los problemas que se me presentaron y salir triunfante de estos.

A mi familia por estar a mi lado y darme su apoyo.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Marcelo y Lorena, mis padres, por estar conmigo en cada momento de la vida y acompañarme durante todo este trayecto en el cual, con sus sabios consejos, su apoyo incondicional y su sabiduría brindada, me han dado la fuerza para no desfallecer, logrando así cumplir con mis sueños y mis metas trazadas.

Agradezco a toda mi familia que siempre ha estado pendiente de mí y ha sido otro pilar fundamental para poder culminar con esta etapa de mi vida, en la cual, si no hubieran estado presentes, no la hubiera vivido con la misma calidad.

A mis amigos y compañeros que han estado conmigo a lo largo de la carrera y son testigos de los grandes esfuerzos que se tiene que hacer dentro de ella. Su presencia fue fundamental para poder avanzar en conjunto y no dejarme decaer en esos momentos en los que se pensaba que no se podía más.

A todos los ingenieros que con sus conocimientos aportados, experiencias y consejos me han ayudado a desarrollarme como profesional.

Al Dr. Gabriel Salazar por su paciencia, amistad, confianza y su conocimiento con el cual se ha logrado desarrollar de manera adecuada el presente trabajo de titulación.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN .....	VII
ABSTRACT .....	IX
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO .....	1
1.1 Objetivo general .....	2
1.2 Objetivos específicos .....	2
1.3 Alcance .....	2
1.4 Marco teórico .....	3
1.4.1 Sistemas de almacenamiento de energía .....	4
1.4.1.1 El desarrollo de los sistemas de almacenamiento de energía .....	4
1.4.1.2 Descripción de tecnologías de sistemas de almacenamiento de energía y sus aplicaciones .....	8
1.4.2 Sistemas de almacenamiento de energía en baterías .....	24
1.4.2.1 Descripción tecnológica .....	24
1.4.2.2 Componentes de un sistema de almacenamiento de energía en baterías a gran escala .....	25
1.4.2.3 Desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía en baterías a nivel global .....	27
2 METODOLOGÍA .....	31
2.1 Determinación de los costos y factores que afectan a la viabilidad de la implementación del banco de baterías .....	31
2.1.1 Costo de almacenamiento .....	32
2.1.2 Servicios comerciales .....	33
2.1.3 Desarrollo de regulaciones .....	37
2.2 Análisis económico-financiero de los beneficios de la implementación de los BESS en sistemas eléctricos a gran escala en el SNI ecuatoriano .....	37
2.2.1 Estimación de beneficios por regulación secundaria de frecuencia .....	37
2.2.2 Estimación de beneficios por control de voltaje .....	40
2.3 Estudios de los modelos de negocio para la implementación de un sistema de almacenamiento en banco de baterías a gran escala .....	43
2.3.1 Modelos de negocios .....	43
2.3.2 Enfoques de los Modelos de Mercado .....	46
2.4 Análisis de la factibilidad económica de la implementación de sistemas de almacenamiento en banco de baterías a gran escala en el SNI ecuatoriano ...	53
3 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	56

3.1	Conclusiones.....	56
3.2	Recomendaciones.....	57
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	59

## RESUMEN

El trabajo de titulación presenta un estudio técnico económico de la implementación de los sistemas de almacenamiento de energía en baterías a gran escala dentro del sistema nacional interconectado (SNI). Este almacenamiento puede tener diferentes usos dentro del SNI como la regulación de frecuencia, arbitraje de energía, control de voltaje etc., en donde el estudio económico juega un papel fundamental para la aplicación de esta tecnología y es lo que se hablara en este trabajo.

En el Capítulo 1 se puede encontrar la descripción del alcance del trabajo al igual que los objetivos generales y específicos planteados para el desarrollo de este.

En el Capítulo 2 se encuentra la metodología con la que se realizó el trabajo. Se presenta los tipos de estudios realizados, el tipo de análisis de datos y la característica de los documentos investigados de los cuales se ha tomado las referencias para realizar el presente trabajo.

En el Capítulo 3 numeral 3.1, se realiza una descripción del desarrollo que han tenido los sistemas de almacenamiento de energía con el pasar de los años. Además, se realiza una clasificación y descripción a detalle sobre las tecnologías de almacenamiento de energía con sus aplicaciones correspondientes.

En el Capítulo 3 numeral 3.2, se puede encontrar una descripción tecnológica de los sistemas de almacenamiento de energía en baterías a gran escala, además, se describe de manera general los componentes que están inmersos en los sistemas BESS y se presentan los diferentes sistemas de almacenamiento de energía en baterías a gran escala.

En el Capítulo 3 numeral 3.3, se encuentra el estudio sobre los factores que pueden afectar la viabilidad de la implementación de los sistemas BESS tomando en cuenta el costo de las baterías con valores reales y pronosticados para un tiempo de 5 años y la remuneración por los diferentes servicios que pueden prestar los sistemas BESS.

En el Capítulo 3 numeral 3.4, se presenta el estudio económico financiero de los beneficios de la implementación de los sistemas BESS en el SNI ecuatoriano indicando las principales ventajas que se puede tener al momento de invertir en este sistema.

En el Capítulo 3 numeral 3.5 se estudian modelos de negocio para la implementación de sistemas de almacenamiento de energía, en donde se encuentra información acerca de quién puede invertir, quién puede comprar estos servicios de almacenamiento y como es

la remuneración al inversor del proyecto todo esto considerando diferentes enfoques explicados en el capítulo correspondiente.

En el Capítulo 3 numeral 3.6, con la información del costo marginal horario y la potencia que se reserva para la regulación secundaria de frecuencia en Ecuador, se realiza el cálculo de los ingresos que se obtendría si se despachasen todos los megavatios asumiendo que la regulación de frecuencia estaría siendo satisfecha por los sistemas BESS.

En el Capítulo 4 se pueden encontrar las recomendaciones y las conclusiones del presente trabajo.

**PALABRAS CLAVE:** Sistemas nacional interconectado SNI, sistemas de almacenamiento de energía, banco de baterías, costo nivelado de energía (levelized Cost of Energy – LCOS), arbitraje de energía, regulación de frecuencia, control de voltaje, modelos de negocio.

## **ABSTRACT**

The degree work presents a technical economic study of the implementation of battery energy storage systems within the national interconnected system (SNI). This storage can have different uses within the SNI such as frequency regulation, energy arbitration, voltage control, etc., where the economic study plays a fundamental role for the application of this technology and is what will be discussed in this work.

In Chapter 1 you can find the description of the scope of the titling work as well as the general and specific objectives.

In Chapter 2 contains the methodology with which the work was carried out. The types of studies carried out, the type of data analysis and the characteristics of the documents investigated from which a reference was taken to carry out the present curricular integration work are presented.

In Chapter 3 numeral 3.1, a description of the development that energy storage systems have had over the years is made. In addition, you can find a classification and description of energy storage technologies with their corresponding applications.

In Chapter 3 numeral 3.2, you can find a technological description of battery energy storage systems, in addition, the components that are immersed in BESS systems are described in a general way and a little description of some storage systems around the world.

In Chapter 3 numeral 3.3, there is the study on the factors that can affect the feasibility of the implementation of the BESS systems taking into account the cost of the batteries with real and forecast values for a time of 5 years and the remuneration for the different services that BESS systems can provide.

In Chapter 3 numeral 3.4, the financial economic study of the benefits of the implementation of the BESS systems in the SNI is presented, indicating the main advantages that can be had when investing in this system.

In Chapter 3, numeral 3.5, business models for the implementation of energy storage systems are studied, where information is found about who can invest, who can buy these storage services and how the project investor is remunerated. considering different approaches explained in the corresponding chapter.

In Chapter 3 numeral 3.6, with the information on the hourly marginal cost and the power reserved for the secondary frequency regulation, the calculation of the income that would

be obtained if all the megawatts were dispatched was made, assuming that the frequency regulation would be satisfied by the BESS systems.

In Chapter 4 you can find the recommendations and conclusions.

**KEYWORDS:** National interconnected systems SNI, energy storage systems, battery banks, levelized cost of energy (LCOS), Peak Shaving and Load Leveling, frequency regulation, voltage control, business models.

# 1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

Alrededor del mundo los sistemas eléctricos de potencia han ido evolucionando y apuntando a una generación de energía eléctrica más limpia en donde las fuentes de energía renovable han marcado la diferencia frente a cualquier otro tipo de generación. [1]

La implementación de estas centrales de generación de energía renovable tiene un desafío importante de mantener constante el suministro de electricidad y de aprovechar la mayor cantidad de energía generada. [2] Debido a las exigencias que presenta el país en mantener una correcta calidad del producto eléctrico se puede utilizar algún tipo de sistema en almacenamiento de energía para ayudar al sistema interconectado con la regulación primaria y secundaria de frecuencia, control de voltaje, arbitraje de energía y la reserva en giro para mantener la calidad de producto constante. [3]

Con el pasar de los años se han ido desarrollando diferentes tipos de sistemas para almacenar energía como los bancos de baterías, aire comprimido, volantes de inercia, bobinas hidráulicas, etc., en donde los bancos de baterías han sido los más utilizados para cumplir con este objetivo. Este sistema de almacenamiento en baterías o más conocidos como BESS (Battery Energy Storage System), a gran escala se ha tomado como una solución para controlar y auxiliar los distintos desequilibrios que se pueden producir en el sistema nacional interconectado. [4]

Los costos de la implementación de BESS han sido un factor importante para considerar la implementación de estos sistemas alrededor del mundo ya que, gracias a sus beneficios, podría ayudar al desempeño del sistema eléctrico de potencia. [4] Además, el número de las empresas que han decidido invertir en la construcción y el manejo de estos sistemas, para los diversos tipos de aplicaciones en los que se los puede usar, ha dado paso a que los costos de implementación se reduzcan, por lo que, para un plazo a corto tiempo, se espera que estos precios sean más competitivos y favorables para las instituciones que deseen manejar sistemas de almacenamiento en baterías. [5]

Debido a esto es que en el presente proyecto se ha tomado la iniciativa de realizar un análisis económico para verificar la viabilidad y factibilidad de la implementación de sistemas de almacenamiento en baterías a gran escala en el sistema nacional interconectado.

## **1.1 Objetivo general**

El objetivo principal de este componente es:

- Evaluar económica y financieramente la implementación de sistemas de almacenamiento de energía en baterías a gran escala.

## **1.2 Objetivos específicos**

Los objetivos específicos de este proyecto son:

1. Determinar la viabilidad de la implementación de los sistemas de almacenamiento de energía en baterías a gran escala analizando los factores económicos que puedan afectar de forma positiva o negativa a esos sistemas.
2. Especificar las ventajas económicas que se presentan al usar un sistema de almacenamiento de energía en baterías dentro de un sistema eléctrico de potencia.
3. Analizar los distintos métodos en los que un sistema de almacenamiento de energía en baterías puede ingresar al mercado dentro del sistema nacional interconectado.
4. Verificar la rentabilidad que se obtiene al implementar los sistemas de almacenamiento de energía en banco de baterías a gran escala.

## **1.3 Alcance**

Se realizará la evaluación de los factores económicos que pueden afectar la implementación de los sistemas de bancos de baterías a gran escala dentro de un sistema eléctrico de potencia logrando determinar así la viabilidad de implementación de un proyecto BESS.

Se realizará un análisis económico-financiero de los beneficios de la implementación de sistemas de almacenamiento para el sistema nacional interconectado ecuatoriano con la información de un año.

Se estudiarán modelos de negocio para la implementación de sistemas de almacenamiento de energía, dirigiendo la investigación para la obtención de información acerca de quién puede invertir, quién puede comprar estos servicios de almacenamiento y como es la remuneración al inversor del proyecto.

Una vez analizado los beneficios económicos-financieros de la implementación de sistemas de almacenamiento de energía en banco de baterías a gran escala se realizará un análisis económico de un año para la implementación de estos sistemas dentro de Ecuador.

## **1.4 Marco teórico**

El sistema nacional interconectado (SNI) de Ecuador representa a toda la infraestructura eléctrica en donde se puede observar todos los elementos del sistema eléctrico conectados entre sí, los cuales permiten realizar la generación y entrega de potencia hacia los centros de consumo permitiendo de esta forma energizar a todo el país. Este sistema eléctrico debe brindar la seguridad y confiabilidad para poder cumplir con las regulaciones establecidas en el país además de proveer un buen servicio y una buena calidad de producto eléctrico.

Las regulaciones existentes en Ecuador se encuentran en constantes modificaciones para lograr ser cada vez más claras sobre las normas fundamentales que deben cumplir los ciudadanos, el estado y las instituciones que han sido creadas por el estado. En este sentido existen regulaciones específicas para el sector eléctrico en donde se indicia que el estado es el encargado de administrar, regular y controlar los sectores estratégicos los cuales son los que tienen influencia económica, política, social y ambiental siendo así la generación de energía un sector estratégico. [6]

A lo largo de los años se ha evidenciado un gran avance en la infraestructura eléctrica del país con el ingreso de nuevas generadoras, nuevas líneas de transmisión y mejorando las interconexiones con los países vecinos de Perú y Colombia. Este avance ha producido un incremento en la economía del sector eléctrico, la calidad del servicio y la confiabilidad de este es por ello por lo que, las regulaciones existentes, han tenido que mejorarse y actualizarse con mayor rapidez para tener una visión más clara de cómo se tiene que manejar el país en el ámbito eléctrico.

Al igual que el progreso de la infraestructura eléctrica del país, el estudio de varias tecnologías que se han desarrollado para poder tener un lugar dentro de la generación de energía eléctrica también ha avanzado de forma rápida en donde algunas de estas ya están aplicadas en varios países como es la generación fotovoltaica y la generación eólica, existen otras tecnologías de generación como la mareomotriz la cual no ha tenido un impacto tan fuerte como para poder ser instaladas.

El avance de las tecnologías de generación ha traído consigo un nuevo tema de investigación que ha venido sonando alrededor del mundo el cual trata sobre como diferentes sistemas pueden aportar como servicio auxiliar a los tipos de generación ya mencionados y a la transmisión y distribución de energía eléctrica. Existen varios servicios auxiliares que pueden aportar con diferentes funciones al sistema nacional interconectado como la regulación de frecuencia, control de voltaje, suministro de potencia reactiva, capacidad de arranque en negro, etc., los cuales ayudan a cumplir con las regulaciones establecidas por el estado.

Dentro de una gran cantidad de servicios auxiliares que se pueden instalar dentro del SNI los sistemas de almacenamiento de energía en baterías a gran escala son los que más fuerza vienen tomando en la actualidad debido a los cómodos costos de inversión que se manejan al implementar este tipo de proyectos. Como se mencionaba, estos sistemas han tomado un impulso bastante fuerte en los últimos años en donde varios países como Chile, Australia, Reino Unido, España, El Salvador y más, han instalado estas tecnologías dentro de sus sistemas interconectados.

Estos sistemas más conocidos como BESS por sus siglas en inglés (battery energy storage system) supone una mejora en la efectividad de la red eléctrica debido a su rapidez de respuesta y su alta eficiencia, además, que se ha establecido como una de las formas más efectivas de dar una mano al desarrollo de recursos renovables.

El desarrollo de estos sistemas presenta varios beneficios tanto técnicos como económicos los cuales se han logrado evidenciar en los diferentes países que tienen esta tecnología ya en uso. Es por todas estas ventajas que en el presente trabajo se estudiarán diferentes temas relacionados con: los diferentes sistemas de almacenamiento de energía, la descripción de ciertos modelos y componentes de los sistemas BESS, los beneficios y las factibilidades económicas de insertar sistemas BESS dentro del SNI ecuatoriano, los diferentes modelos de negocio que se pueden manejar con la implementación de estos sistemas y además de nombrar ciertos factores que pueden complicar el desarrollo de estos proyectos.

#### **1.4.1 Sistemas de almacenamiento de energía**

##### **1.4.1.1 El desarrollo de los sistemas de almacenamiento de energía**

Los sistemas de almacenamiento han tenido un camino bastante largo para llegar a desarrollarse como lo han hecho hasta el día de hoy. Un ejemplo de este avance de tecnologías de almacenamiento se da en las baterías en donde, desde la

creación de la primera batería en el año 1800 por Alessandro Volta ha habido innumerables desarrollos que marcaron el inicio de nuevas tecnologías disponibles. [7]

En la tabla 1 se presenta un breve resumen de la evolución que han tenido los sistemas de almacenamiento de energía con el pasar de los años, en donde el papel que han ido tomando estos sistemas ha sido cada vez más importante.

**Tabla 1.** Evolución de los sistemas de almacenamiento. [7]

<b>Año</b>	<b>Sistema de Almacenamiento</b>	<b>Descripción</b>
<b>Mas antigua</b>	Biocombustibles	Este almacenamiento se utilizaba en la antigüedad como la madera y otra biomasa sólida.
<b>1839</b>	Pilas de combustible	Las pilas de combustible se inventaron en 1839 por el químico, físico y abogado William Grove.
<b>1859</b>	Baterías de plomo-ácido	Es la primera batería recargable que se inventó por Gaston Planté en el año de 1859.
<b>1882</b>	Bombeo hidráulico (PHS)	En 1882, la primera central hidroeléctrica del mundo comenzó a operar en los Estados Unidos a lo largo del río Fox en Appleton, Wisconsin.
<b>1883</b>	Volante de inercia (FES)	El primer FES utilizado únicamente para sistema de almacenamiento estaba hecho de acero y fue desarrollado por John A. Howell en 1883 para aplicaciones militares.
<b>1884</b>	Baterías de flujo	El ingeniero francés Charles Renard inventó las baterías de flujo en 1884 para impulsar un dirigible con hélice eléctrica.

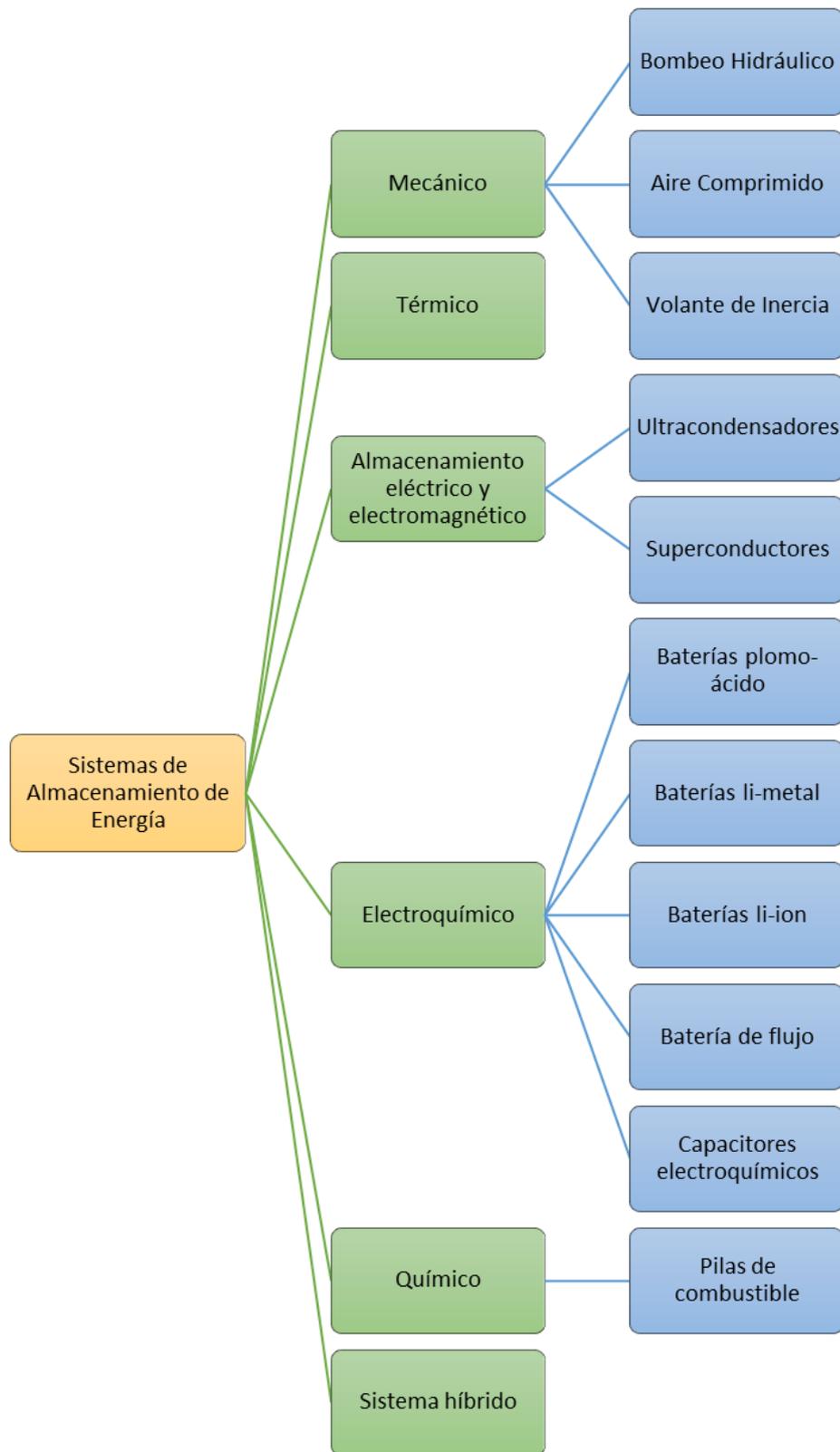
<b>1899</b>	Batería de níquel-cadmio	La batería de níquel-cadmio fue inventada por Waldemar Jungner en 1899. En 1947 se produjeron más mejoras que dieron lugar a la moderna batería sellada de NiCd.
<b>1899</b>	Batería de níquel-zinc	La batería de níquel zinc se inventó por primera vez en 1899. Su producción comercial comenzó en 1920.
<b>1901</b>	Batería de níquel-hierro	La batería de níquel-hierro fue desarrollada por Thomas Edison en 1901 y se utilizó para vehículos eléctricos, como Detroit Electric y Baker Electric.
<b>1960</b>	Batería de azufre de sodio	La batería de azufre de sodio fue descubierta por primera vez por Ford Motor Company en 1960 para alimentar los primeros modelos de automóviles eléctricos.
<b>1967</b>	Batería de hidruro metálico de níquel	La investigación sobre la batería de hidruro metálico de níquel comenzó en 1967.
<b>1968</b>	Batería de haluro metálico de sodio	También conocidas como baterías ZEBRA, las baterías de haluro metálico de sodio se introdujeron por primera vez en Sudáfrica en 1968.

<b>1969</b>	Superconductor	El superconductor fue propuesto por primera vez como un método de almacenamiento diurno en el año 1969.
<b>1970</b>	Batería de hidrógeno de níquel	La batería de Níquel-Hidrógeno fue desarrollada por los laboratorios Comsat y Tyco, patrocinados por Intelsat.
<b>1978</b>	Ultra condensador	La investigación sobre los ultra condensadores comenzó en 1957 por General Electric Company. Seguido de muchos episodios de desarrollo, el supercondensador se comercializó en 1978.
<b>1978</b>	Aire comprimido (CAES)	El primer proyecto CAES a escala de servicios públicos fue la planta Huntorf de 290 MW en Alemania con un domo de sal, que comenzó en 1978.
<b>1980</b>	Batería ion-litio	En 1980, el profesor de física estadounidense John Goodenough inventó la batería de iones de litio.
<b>1980</b>	Batería de litio-polímero	El descubrimiento de la batería de polímero de litio se produjo en la década de 1980. La primera celda de Li-ion comercial fue de Sony en 1991.
<b>Actual</b>	Combustibles solares	Impulsados por preocupaciones ambientales, los combustibles solares están ganando atención recientemente y aún están bajo investigación y desarrollo.

#### **1.4.1.2 Descripción de tecnologías de sistemas de almacenamiento de energía y sus aplicaciones**

Con el pasar de los años los humanos han tenido la necesidad de investigar nuevos métodos de almacenamiento de energía para poder tener un sistema eléctrico más eficiente el cual cuente con una reserva para solventar cualquier inconveniente que pueda surgir en la generación, transmisión o distribución de energía eléctrica.

Los sistemas de almacenamiento se pueden clasificar dependiendo de la función que va a cumplir, la velocidad que tiene su respuesta, la forma de almacenar la energía, la duración de su almacenamiento, su vida útil, etc. La energía se puede almacenar de forma mecánica, electroquímica, química, térmica o en forma de campos eléctricos o magnéticos. En la figura 1.1 se presenta la clasificación de los diferentes métodos de almacenar la energía seguido de una explicación de estos mismos. [7]



**Figura 1.1** Clasificación de los sistemas de almacenamiento de energía.

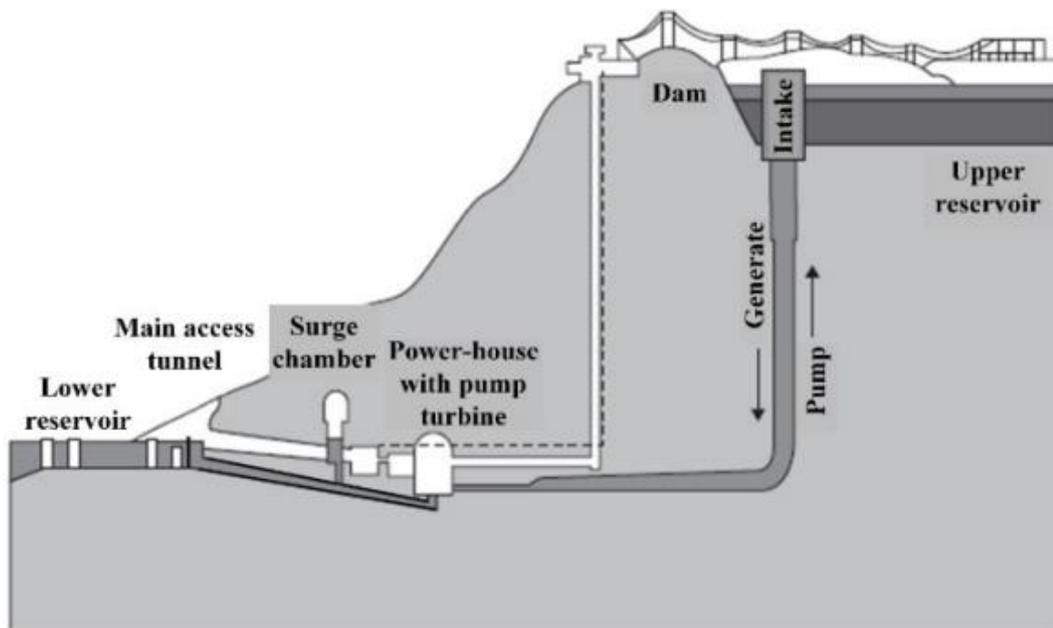
- **Almacenamiento de energía mecánica**

- *Bombeo hidráulico*

Más conocido como PHS por sus siglas en inglés (pumped hydro storage) es una tecnología que ha ido avanzando con el tiempo alcanzando una eficiencia de 76-85% con un bajo costo de capital por unidad de energía, capacidad de tener largos periodos de almacenamiento, vida útil de alrededor de 50 años y un ciclo de vida prácticamente ilimitado. Este sistema tiene un funcionamiento similar al de una central hidroeléctrica convencional con la diferencia de que esta posee dos embalses, uno debajo del otro.

Se sabe que la central convencional utiliza su embalse para liberar agua hacia las turbinas utilizando la energía potencial gravitacional del agua para convertirla en energía eléctrica, donde el agua puede ser utilizada solo una vez.

El PHS tiene dos embalses en donde del superior se vierte el agua hacia las turbinas para generar electricidad, con la misma idea que una central convencional, y el agua se almacena en el embalse inferior el cual posee una sala de turbinas de bombeo por donde el agua es devuelta al embalse superior para que esta pueda ser utilizada nuevamente y así este proceso se puede repetir varias veces, teniendo en cuenta que el bombeo se produce en horas de baja demanda y el vertimiento en horas de alta demanda. En la figura 1.2 se presenta un esquema de PHS. [7]



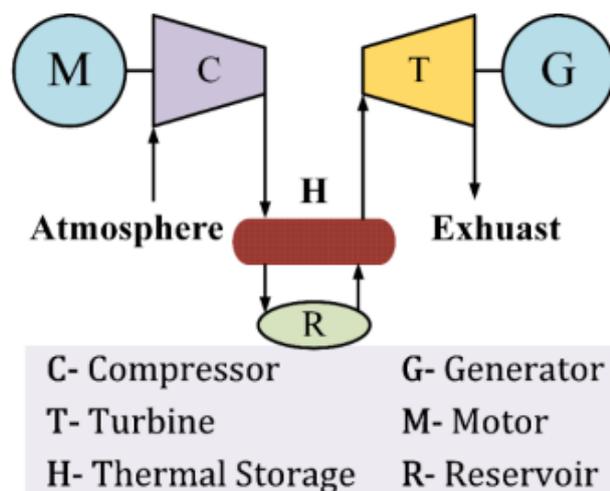
**Figura 1.2** Esquema de un PHS. [7]

- *Aire comprimido*

Conocido como CAES por sus siglas en inglés (compressed air energy storage), este sistema es más pequeño en comparación a los PHS pero el sitio en el que se realiza la construcción de este es más extendido por lo que este sistema puede tener una red de almacenamiento a gran escala más ampliamente distribuida.

Estos sistemas pueden tener aplicaciones para la regulación de frecuencia, arbitraje de energía y nivelación de carga debido a que tienen una capacidad de entre 35-300 MW.

Los CAES tienen dos componentes principales que son el recipiente de almacenamiento y un compresor/expansor. La central CAES tiene un funcionamiento similar al PHS en donde el excedente de electricidad durante las horas de demanda baja se lo utiliza para comprimir el aire a alta presión y almacenarlo en la cámara de almacenamiento. En las horas de alta demanda, el aire pasa por el expansor para recuperar de esta forma la energía almacenada. En la figura 1.3 se presenta el esquema de un sistema CAES. [7]



**Figura 1.3** Esquema de un CAES. [7]

- *Volante de inercia*

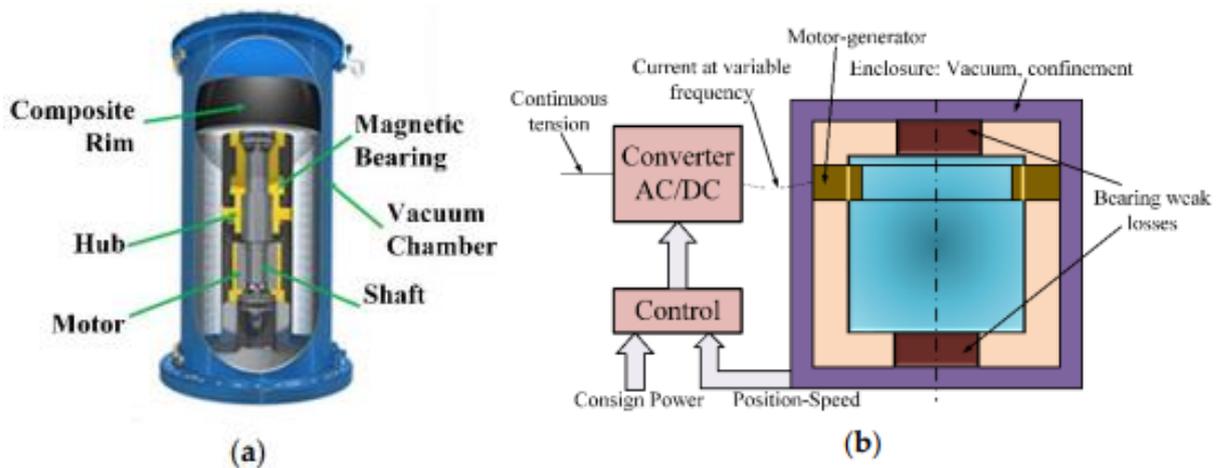
Más conocido como FES por sus siglas en inglés (flywheel energy storage) tienen una alta densidad de potencia, alta eficiencia, la potencia que tiene puede encontrarse entre los MW y los GW y tiene una capacidad de almacenamiento de energía de hasta los 500 MJ.

Esto hace que el FES sea útil para una amplia gama de aplicaciones de almacenamiento de energía en el campo del sistema de energía, sistema militar,

satélites, transporte, etc. Este sistema es también utilizado para poder realizar nivelaciones de carga y la reducción de picos en donde la energía se almacena en demanda baja y se utiliza en los horarios en donde la demanda aumenta.

El funcionamiento de este sistema se da en que el volante utiliza la energía cinética de un cilindro para almacenar la energía de forma mecánica. Mediante los cojinetes que se encuentran en el sistema acoplados magnéticamente, el cilindro se recarga sobre el estator y el motor/generador eléctrico se acopla con el sistema. El sistema FES almacena energía cuando la volante gira a velocidades muy altas debido al motor eléctrico, a esto se le denomina la etapa de carga. Mientras que en la etapa de descarga, esta energía cinética se la utiliza para hacer actuar al motor como generador y así producir energía eléctrica.

Según la velocidad de rotación del volante, estos sistemas se pueden clasificar en dos tipos: Fes de baja velocidad y FES de alta velocidad. Los FES de baja velocidad tienen una velocidad de rotación menores a los 6000 rpm y estos se los puede utilizar para aplicaciones de suministro de energía ininterrumpida y confiabilidad de energía. Los FES de alta velocidad tienen una velocidad de rotación de alrededor de  $10^4 - 10^5$  rpm y estos son adecuados para aplicaciones aeroespaciales y de tracción además, puede integrarse parcial o totalmente con máquinas eléctricas. Se debe tener en cuenta que los costos de los FES de alta velocidad son casi cinco veces mayores a los FES de baja velocidad. En la figura 1.4 se presenta: el sistema de almacenamiento de energía de volante donde la energía se almacena como energía cinética rotacional de un cilindro en el vacío (a) y el diagrama esquemático del almacenamiento de energía del volante, conocido como acumulador.



**Figura 1.4** a) sistema de almacenamiento de energía y b) esquema del almacenamiento de energía. [7]

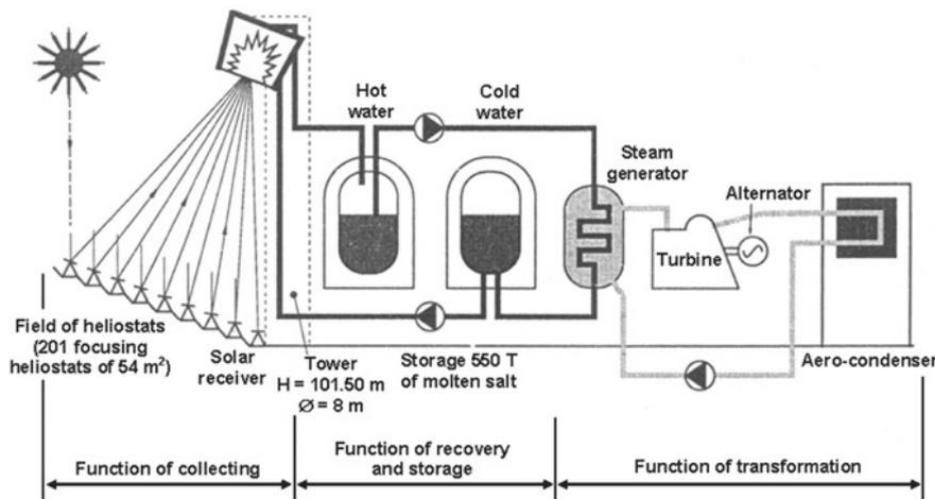
- **Almacenamiento de energía térmica**

Conocida como TES por sus siglas en inglés (thermal energy storage) puede almacenar energía en forma de calor latente, calor sensible y reacciones termoquímicas reversibles, este tipo de almacenamiento se ha venido utilizando para la distribución de energía y la eficiencia energética a corto o largo plazo.

Este sistema tiene aplicaciones en industrias o edificios, puede tener un incremento en la confiabilidad y la economía en general además de que es un sistema amigable con el medio ambiente.

Los TES, en su mayoría, son aplicados en conjunto con sistemas solares fotovoltaicos. Así a más de producir energía mediante los paneles fotovoltaicos, los sistemas pueden asegurar la recolección de la energía del sol que se la podrá utilizar en la noche o en momentos en donde se produzca una variación en el clima como la presencia de nubes o lluvia.

Estos sistemas tienen bajas pérdidas por autodescarga de entre 0,05–1%, buena densidad de energía entre 80–500 Wh/L, una alta energía específica entre 80–250 Wh/kg y bajo costo de capital de entre 3–60%, aunque también tiene una eficiencia de ciclo baja de 30–60%. [7] En la figura 1.5 se presenta el esquema de un TES.



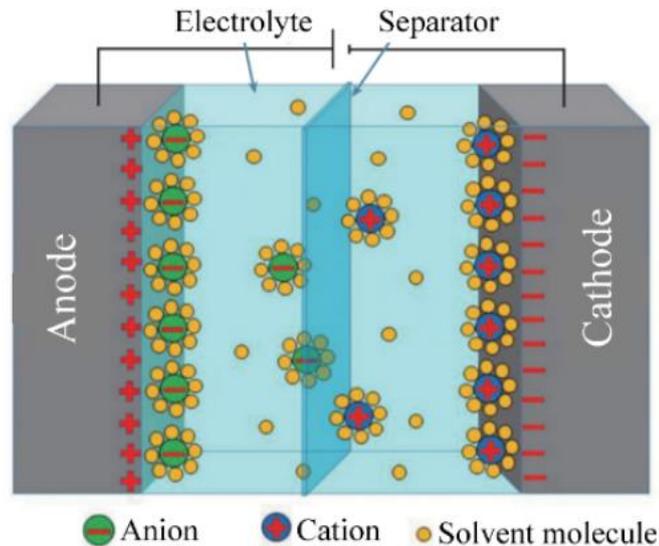
**Figura 1.5** Esquema de un TES. [8]

- **Almacenamiento eléctrico y electromagnético**

- *Ultra condensadores (EDLC)*

Los ultra condensadores o más conocidos como condensador eléctrico de doble capa – EDLC por sus siglas en inglés (electric double layer capacitor) tiene un

mecanismo muy similar al de los condensadores convencionales. Con la diferencia de que este posee una gran superficie interfacial de electrodos la cual puede ofrecer una densidad de carga mucho mayor que los condensadores convencionales, mientras que los capacitores tienen una capacidad en el orden de los mF, los ultra condensadores alcanzan magnitudes de 5 000 F. En la figura 1.6 se da a conocer la representación esquemática de un EDLC. [7] [9]



**Figura 1.6** Esquemático de un EDLC. [7]

Para la composición de un EDLC se tiene que dos electrodos se sumergen en una solución electrolítica acuosa y estos son separados mediante un separador que es permeable a los iones. La función que tiene este separador es la de evitar que se produzcan cortocircuitos entre los electrodos y cada uno de estos electrodos está unido con un colector de corriente metálico y la absorción reversible de iones por parte del electrodo del electrolito hace que la energía se almacene electrostáticamente dentro del EDLC. Se producirá un exceso o déficit de carga en la superficie del electrodo lo que da como resultado la creación de iones con carga opuesta en el electrolito y la capacitancia emerge debido al verdadero efecto de la capacitancia. Se tiene que la capacitancia va a depender del ancho de la capa en el límite electrolito-electrodo y su espesor es menor en comparación con el ancho del separador.

La capacitancia va a depender del área superficial, la permitividad, y la longitud efectiva de la doble capa eléctrica, en donde debido a este último factor, el almacenamiento de carga es un proceso superficial por lo que las características superficiales de los materiales de los electrodos tienen un gran impacto en las

capacitancias. Últimamente se han realizado varios estudios en donde el uso de una base de carbón como material del electrodo ha presentado mejores beneficios como una mayor superficie, menor costo y mayor disponibilidad, es por eso por lo que se lo ha puesto en uso, en la tabla 2 se presentan algunos materiales a base de carbón con sus correspondientes capacitancias [7]

**Tabla 2.** Materiales de electrodos ELDC a base de carbón.

Material del Electrodo	Electrolito	Capacitancia específica
AC (acetilo)	<b>Acuoso (NaOH/KOH)</b>	<b>200 – 400</b>
Carbón Templado	<b>Acuoso (NaOH/KOH)</b>	<b>120 – 350</b>
CNT (nanotubos de carbono)	<b>Acuoso (NaOH/KOH)</b>	<b>20 – 180</b>
Carbón derivado del carburo	<b>Líquido iónico (KCl/NaCl)</b>	<b>100 – 150</b>
Carbón negro	<b>Acuoso (NaOH/KOH)</b>	<b>&lt;300</b>
Carbón aerogeles/xerogeles	<b>Acuoso (NaOH/KOH)</b>	<b>40 – 200</b>
Grafito y óxido de grafeno reducido (rGO)	<b>tetrafluoroborato de tetraetilamonio (Et4NBF4)</b>	<b>10 – 150</b>
Carbono mesoporoso	<b>KOH</b>	<b>180</b>

○ *Superconductor (SMES)*

Conocido como SMES por sus siglas en inglés (super magnetic energy storage) son los únicos sistemas que tienen la capacidad de poder almacenar energía eléctrica sin la necesidad de realizar una conversión de por medio a otra forma distinta de energía.

Las principales características de estos sistemas es que tienen una gran densidad de potencia y el tiempo de respuesta está en el orden de los milisegundos, tiene una mayor esperanza de vida útil y un mayor tiempo de ciclo lo cual brinda la característica de controlar la potencia activa y reactiva por separado mediante

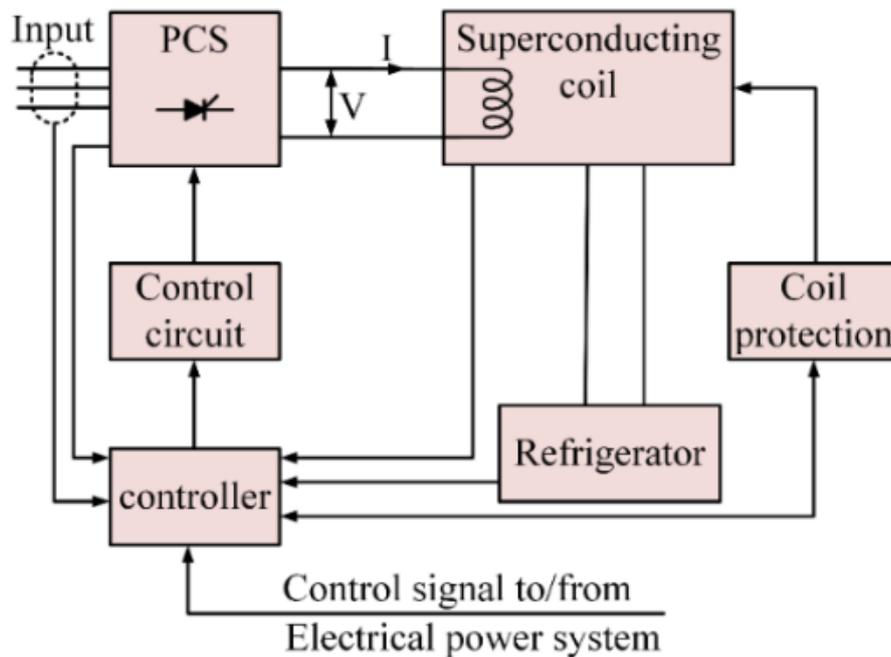
SMES distribuidos. Pero, no hay que dejar de lado las desventajas que también presenta como la baja densidad de energía volumétrica y gravimétrica, el desgaste del material por los trabajos mecánicos realizados y los costos, son algunas de las características que pone en desventaja y ciertas limitaciones al sistema SMES.

El funcionamiento de este sistema se da en que la corriente continua se induce en bobinas superconductoras que no presenta ningún tipo de resistencia al flujo de la corriente. El elemento con el que están compuestas estas bobinas es el de niobio-titano (NbTi) que tienen que estar con una temperatura menor a  $-2700\text{ }^{\circ}\text{C}$ , esto es posible realizar mediante un sistema criogénico con el sistema SMES. Esta temperatura requerida se mantiene por debajo de este valor con la ayuda de un sistema de refrigeración lo que provoca una reducción en la eficiencia de todo el sistema debido a que, esta refrigeración, consume una gran cantidad de energía. Sin embargo, ya que el sistema SMES no tiene ninguna resistencia, la eficiencia es de más del 95%. El SMES está compuesto por cuatro partes principales que son:

1. El imán superconductor que se mantiene en el vacío y se aísla térmicamente mediante un Dewar.
2. El sistema de refrigeración criogénica para mantener la temperatura de la bobina superconductora por debajo de la temperatura crítica.
3. Tiene un sistema de acondicionamiento de potencia. Este tiene diferentes dispositivos electrónicos de potencia como transistores, capacitores, inductores, etc., en donde la función de este es la de regular el intercambio de energía eléctrica entre la red y el sistema SMES.
4. Sistema de control cuya función es la de monitorear los diferentes parámetros del sistema como la corriente, presión, temperatura, deformación, etc., y el de realizar ajustes al sistema criogénico.

[7]

En la figura 1.7 se presenta el esquema de los sistemas SMES.



**Figura 1.7** Esquemático del sistema SMES. [7]

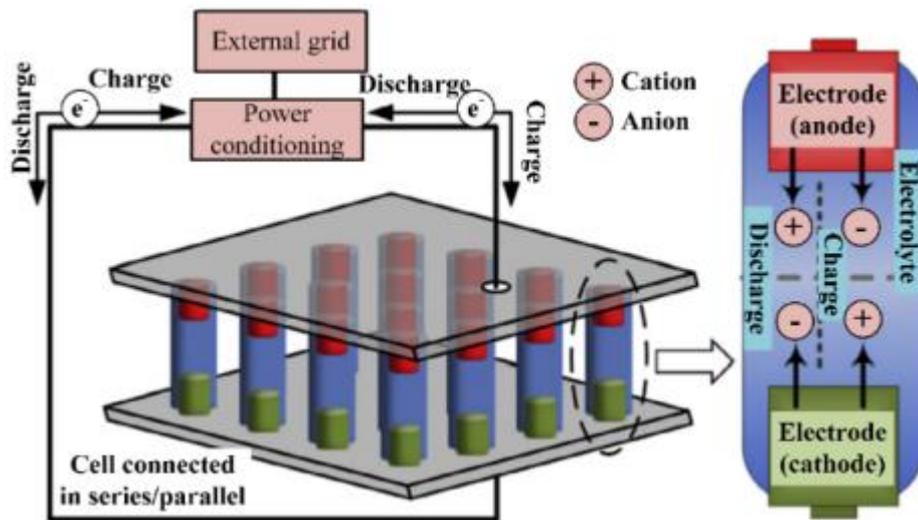
- **Almacenamiento electroquímico**

El sistema de almacenamiento electroquímico está compuesto por el almacenamiento de energía en baterías y por baterías de flujo los cuales almacenan energía en forma de energía química. Estos sistemas tienen una gran eficiencia de alrededor del 70 – 80% además que requieren un mínimo mantenimiento. Estos sistemas conocidos como ECSS por sus siglas en inglés (electrochemical storage system) pueden tener diferentes utilidades con su almacenamiento de energía como nivelación de cargas, arbitraje de energía, control de frecuencia, etc.

En la figura 1.8 se presenta el diagrama esquemático de la operación de un sistema de almacenamiento de energía en baterías. Las celdas de las baterías constan de dos electrodos que tiene carga opuesta, ánodo-cátodo, en donde estos electrodos se encuentran sumergidos en un electrolito el cual se puede encontrar en un estado sólido, líquido o viscoso. Cuando se produce una descarga se presenta una reacción electroquímica en donde el metal del ánodo se disuelve en el electrolito en forma de aniones dejando electrones en el ánodo. Los electrones viajan del ánodo al cátodo por el circuito externo por lo que se produce la corriente debido al flujo de los electrones. Caso contrario, cuando se realiza una carga, los electrones viajan en sentido opuesto, del cátodo al ánodo. Debido a que el voltaje que se produce en

una celda de la batería no es suficiente para cumplir con los requerimientos se conectan varias celdas en serie para producir el voltaje de salida deseado.

Dependiendo de las características químicas y de la construcción las baterías pueden caracterizarse en diferentes tipos como baterías de plomo-ácido, litio-ión, aire-metal, litio-polifosfato, etc. [7]



**Figura 1.8** Diagrama esquemático de un sistema de almacenamiento de energía en baterías. [7]

- *Baterías plomo-ácido*

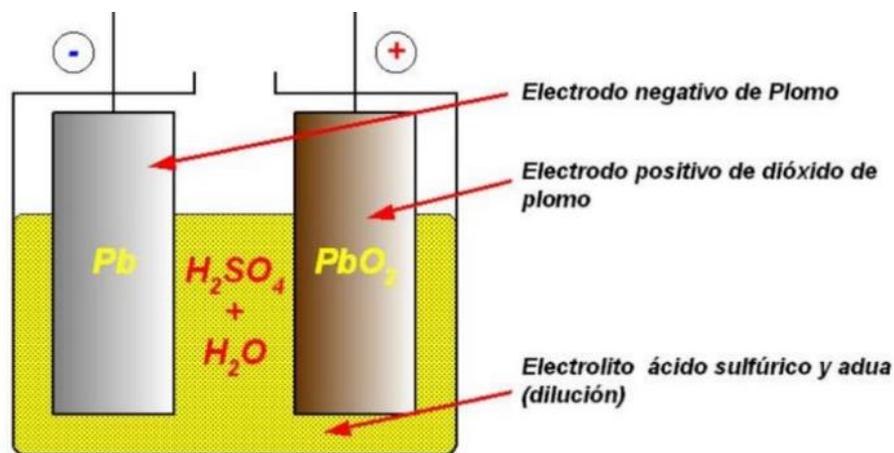
Esta batería fue una de las primeras en salir al mercado y la primera en que podía cargarse pasando corriente inversa por ella. Se ha podido utilizar durante varios años por lo que es considerada una de las baterías con una tecnología confiable y aceptable alrededor de todo el mundo.

Este tipo de baterías puede entregar una gran cantidad de energía debido a su alta tasa de descarga y poseen un mantenimiento despreciable y no tiene memoria lo que quiere decir que la batería puede ser recargada repetidamente sin llegar a afectar en lo mínimo a su capacidad máxima.

Según el consejo internacional de baterías conocido como BCI por sus siglas en inglés (battery council international), estas baterías son amigables con el medio ambiente llegando a tener una tasa de reciclaje del 99.4% lo que la convierte en un producto muy reciclado.

Este tipo de baterías se las puede utilizar en industrias como telecomunicaciones, sistemas de energía, sistemas de radio y televisión, vehículos eléctricos, montacargas, etc.

Estas baterías están compuestas por dos placas, un cátodo con carga positiva y un ánodo con carga negativa. El cátodo se compone de plomo esponjoso y el ánodo está compuesto de dióxido de plomo. Estos dos elementos se encuentran sumergidos en un electrolito de ácido sulfúrico al 37.7%, además de estos materiales también se pueden encontrar otros elementos que componen la batería como madera, cartón, cables y conectores, papel, acero y polietileno. En la figura 1.9 se presenta un esquemático de las baterías de plomo-ácido. [7]



**Figura 1.9** Esquemático de la batería de plomo-ácido. [10]

- *Baterías litio-metal*

Una de las principales características del litio es que es uno de los metales más livianos lo que hace que esta batería se mas livianas que algunas otras y se debe mencionar que estos elementos tienen una alta densidad de carga.

Tiene un voltaje de salida el cual puede oscilar alrededor de los 1,5 y 3,7 voltios. Estas baterías se las puede encontrar desde productos electrónicos de consumo hasta la aplicación en los vehículos eléctricos. Según varias investigaciones se ha venido insinuando que este tipo de baterías tendría un fuerte regreso a la industria después de haber sido eclipsadas por las baterías de ion-litio por casi medio siglo.

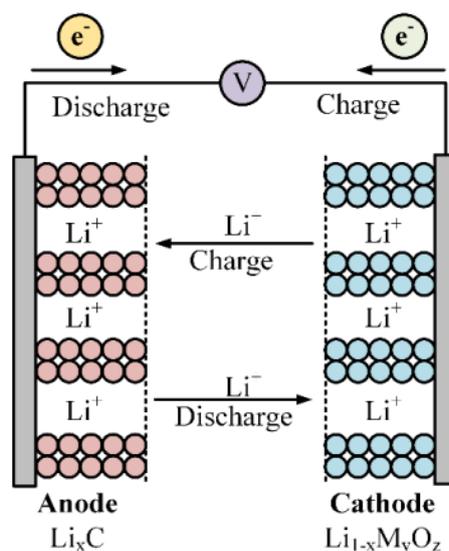
Se debe mencionar que este tipo de baterías tienen dos problemas que son: ser muy propensas a la explosión y la formación de dendritas que son pequeñas protuberancias en forma de púas que se forman en el ánodo de las baterías de litio metal que pueden llegar a romper el separador que existe entre el ánodo y el cátodo.

Este problema está siendo investigado y se está trabajando en ello realizando un tipo de recubrimiento superficial para el ánodo. Es por esto por lo que se dice que en un futuro este tipo de baterías podrá sustituir a otras tecnologías ya existentes.[7]

○ *Baterías litio-ion*

Esta tecnología es la más usada en los últimos años desde su creación en 1990. Han ido ganando su lugar en el mercado debido a varias características importantes como larga vida útil, altos voltajes de funcionamiento, menor tasa de autodescarga, mayor densidad de carga, su peso más ligero, etc.

La batería de iones de litio está compuesta por un electrodo-ánodo positivo, un electrodo-cátodo negativo, un separador, un electrolito y dos colectores de corriente. El ánodo consiste en óxido de metal litiado mientras que el cátodo consiste en carbono con una estructura de capas. El electrolito está compuesto por sal de litio, que se disuelve en carbonatos orgánicos. Durante la fase de descarga, los átomos de litio en el ánodo se ionizan y se difunden debido al pequeño cambio en la concentración de electrolitos en donde estos iones son llevados por el electrolito al cátodo donde se combinan con el electrón externo y se depositan como átomos de litio. El movimiento de los iones de litio crea electrones libres en el ánodo, que fluye a través del circuito externo y luego al cátodo donde se recombina con los iones de litio. El separador detiene el flujo directo de electrones del ánodo al cátodo. La reacción inversa tiene lugar durante la fase de carga. El principio de funcionamiento de las baterías de iones de litio se muestra en la figura 2.0. [7]



**Figura 2.0** Principio de funcionamiento de la batería de ion-litio. [7]

- *Baterías de flujo*

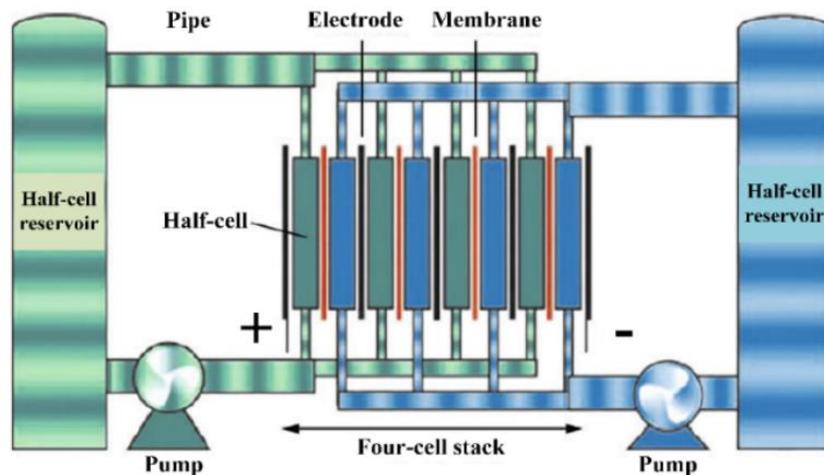
Este tipo de batería es conocida como batería electrolítica acuosa avanzada que por sus características se puede decir que es una mezcla entre pilas de combustible convencionales y baterías siendo capaces de liberar una gran cantidad de energía a una alta tasa de descarga. La principal diferencia con las baterías convencionales se encuentra en que una o más especies electroactivas se disuelven en el electrolito, lo que quiere decir que, la energía se almacena en el electrolito.

La mencionada especie electroactiva fluye por el núcleo de energía convirtiendo la energía química en electricidad por lo que las baterías de flujo consisten en electrolitos activos y no poseen autodescargas. El electrolito adicional es almacenado en los tanques externos separados y se bombea a través del reactor y provoca la reacción química.

Se debe conocer que las reacciones químicas mencionadas anteriormente que tienen lugar dentro de estas baterías son reversibles por lo que pueden tener una recarga sin reemplazar el material electroactivo. Esta tecnología tiene un largo ciclo de vida que puede entregar 10 000 ciclos completos durante su vida útil.

Se puede hablar de la capacidad de las baterías en donde el almacenamiento de energía depende del volumen del depósito y de la concentración que tenga el electrolito por lo que estas baterías pueden desacoplar la potencia nominal y la capacidad de almacenamiento siendo así muy adecuadas para aplicaciones de almacenamiento relacionado con la potencia y la energía.

Teniendo en cuenta la temperatura de operación de estas baterías, son capaces de operar cerca de la temperatura ambiente teniendo un tiempo de respuesta en el orden de los milisegundos con una alta eficiencia. En la figura 2.1 se presenta el diagrama esquemático de la batería de flujo. [7]



**Figura 2.1** Diagrama esquemático de la batería de flujo. [7]

- **Almacenamiento químico**

- *Pilas de combustible*

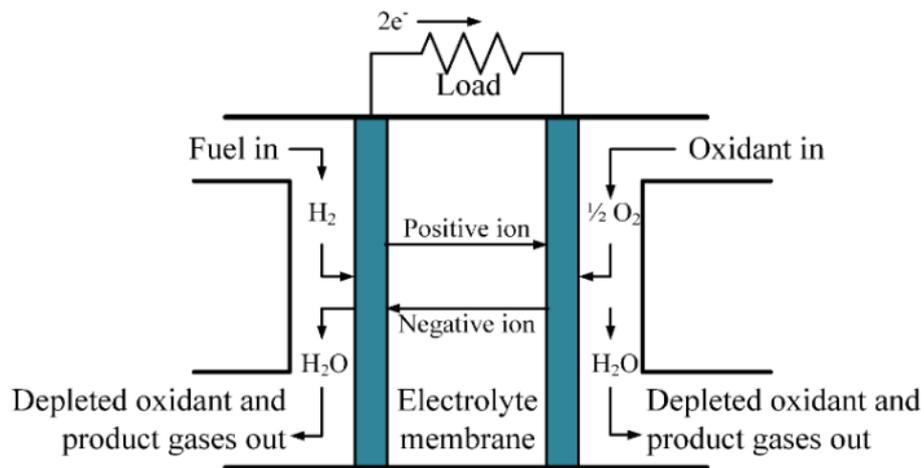
Esta pila de combustible o también conocida como celda de combustible puede convertir la energía química de alguna reacción que se haya producido directamente en energía eléctrica logrando producir hidrógeno y agua como subproductos.

Estas celdas de combustible tienen un objetivo principal el restaurar la energía utilizada para producir hidrógeno mediante la electrólisis de agua siendo así esta tecnología una combinación de las mejores características de los motores y las baterías.

Las pilas de combustible tienen una vida útil de alrededor de 15 años con una alta tasa de carga y descarga además de una alta densidad de energía. Es por esto por lo que, las celdas de combustible tienen una aplicación en el almacenamiento de energía en mínima y gran escala, se utiliza para la reducción de picos, nivelación de carga y aplicaciones para poder gestionar la demanda, se puede utilizar también en la generación distribuida integrándola a la red para así controlar los niveles de voltaje, realizar regulación de frecuencia mejorando así la calidad de energía. Sin embargo, la baja eficiencia de ida y vuelta y la corta expectativa de vida, junto con los costos asociados, son los principales obstáculos para la implementación generalizada de las celdas de combustible.

Similar a las baterías convencionales esta posee dos electrodos que se encuentran en contacto con una capa de electrolito. El ánodo es el electrodo que suministra

combustible de hidrógeno de forma continua mientras que en el cátodo, el aire en forma de oxígeno se alimenta de forma continua. El hidrógeno se descompone en iones  $H^+$  y electrones en el ánodo y la membrana electrolítica permite que el  $H^+$  fluya del ánodo al cátodo, sin embargo, no permite el flujo de electrones. Estos electrones viajan del ánodo al cátodo por medio de un circuito externo y se recombinan con el hidrógeno y el Oxígeno para producir agua. [7] En la figura 2.2 se presenta las reacciones de las celdas de las pilas de combustible.



**Figura 2.2** Diagrama de funcionamiento de la celda de combustible. [7]

- **Almacenamiento híbrido**

Los sistemas de almacenamiento pueden ser utilizados para diferentes aplicaciones pero no tiene la capacidad de poder satisfacer todas las necesidades de un usuario en particular, por lo que se busca un sistema híbrido el cual pueda cumplir con la mayoría de los requerimientos.

Los sistemas de almacenamiento híbridos también conocidos como HESS por sus siglas en inglés (hybrid energy storage system) están diseñados para que se pueda cumplir con varios requerimientos como lo indicábamos anteriormente, logrando así reducir significativamente los costos de instalación y mantenimiento ya que se tiene un solo sistema.

Los HESS pueden presentar mejores rendimientos, una mayor eficiencia, una mayor vida útil con un menor costo de instalación al igual que un diseño y tamaño más adecuado.

Estos sistemas de almacenamiento se los puede utilizar en varias aplicaciones como los vehículos eléctricos híbridos, vehículos eléctricos impulsados por celdas

de combustibles, sistema de suministro de energía renovable que usa una combinación de batería/hidrógeno, se puede conectar los HESS a la red en uso doméstico o regional, a gran escala, en parques eólicos y solares, etc. [7]

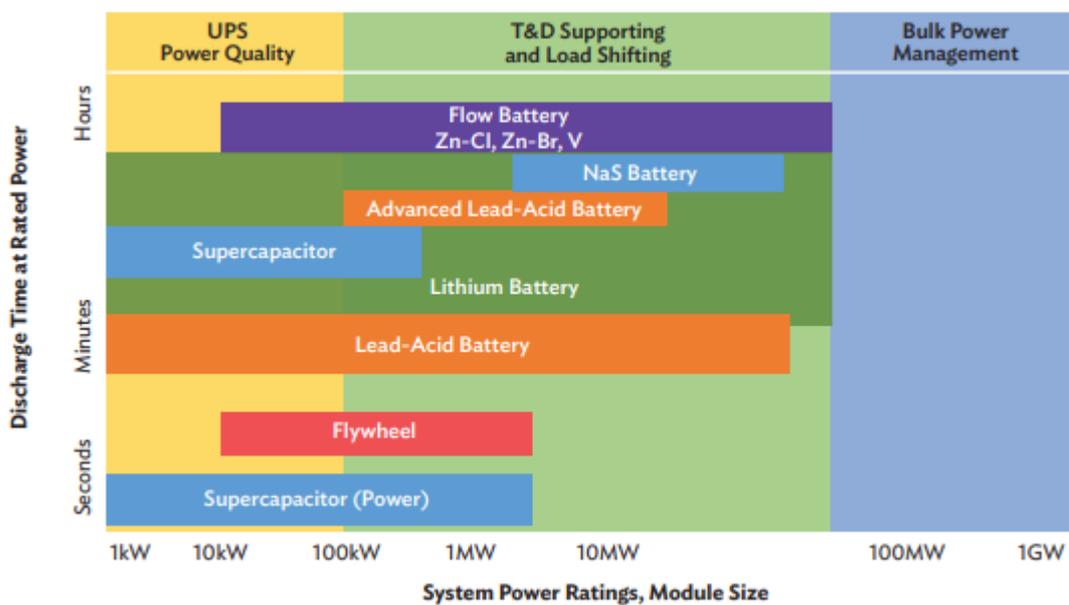
## 1.4.2 Sistemas de almacenamiento de energía en baterías

### 1.4.2.1 Descripción tecnológica

Debido a los recientes avances de la fabricación de los vehículos eléctricos el aumento de la producción de baterías de litio y la reducción de su costo han impulsado la demanda de estos dispositivos de almacenamiento en dichas baterías. Se puede encontrar en el mercado una mayor cantidad de tecnologías de baterías como las de plomo y de sodio-azufre pero el uso de estas depende de su rendimiento, vida útil, lugar en el que se las va a usar y más.

Estos dispositivos de almacenamiento se los puede localizar para realizar suministros de energía ininterrumpida (uninterruptible power supply - UPS), realizar soportes en los sistemas de transmisión y distribución (transmission and distribution system support - T&D) o poder realizar una generación a gran escala, esto dependerá nuevamente de la tecnología y la capacidad de almacenamiento que estos tengan, las aplicaciones que pueden tener los sistemas de almacenamiento se los estudiara más adelante.

En la figura 2.3 se presentan las diferentes tecnologías comparando la potencia de salida en vatios y el consumo de energía en vatios/hora.



**Figura 2.3** Potencia de Salida (W) vs Consumo de Energía (W/h). [11]

Como se mencionó anteriormente las baterías se diferencian en función de la densidad de energía, la eficiencia de carga y descarga, su vida útil y los efectos que pueden causar en el medio ambiente. Se conoce que las baterías de litio almacena de 150 a 250 W/h por kilogramo y estas pueden almacenar hasta el doble de energía que las baterías de sodio-azufre y hasta 5 veces más que las baterías de plomo, además que, las baterías de litio tienen la mayor eficiencia de carga y descarga, con un 95%, mientras que las baterías de almacenamiento de plomo están entre un 60% y un 70% por lo cual se puede apreciar que la tecnología que usa baterías de litio es la más apropiada para el uso debido a todos los beneficios que se presentaron. [11]

#### **1.4.2.2 Componentes de un sistema de almacenamiento de energía en baterías a gran escala**

- **Baterías**

Estos son los componentes principales de un sistema BESS en donde se presenta el mayor porcentaje de inversión lo cual va a depender de la tecnología que se use. Los niveles de tensión que pueden manejar los sistemas de almacenamiento en baterías dependen mucho del tipo de conexión que estos tengan, los cuales pueden ser arreglos en serio, paralelo o mixtos para así poder formar la capacidad necesaria, la tensión que puede entregar varía entre los 400 y 1 200 V. [3]

- **Convertor**

Los convertidores DC-AC es uno de los elementos que se consideran de mayor importancia debido a que, como la conexión del sistema de almacenamiento es con la red, este trabaja con corriente alterna, por lo cual la corriente que sale de las baterías debe tener una conversión para poder ser utilizada. La electrónica de potencia es la que se encuentra inmersa en este proceso ya que se utilizan diferentes elementos para realizar la conversión mencionada anteriormente.

Estos elementos tienen que ser lo más exactos posibles, es por ello por lo que se busca inversores que produzcan una onda sinusoidal casi perfecta que contenga el menor porcentaje de distorsión armónica para evitar así que se provoquen efectos no beneficiosos por la conexión con la red. [3]

- **Sistema de gestión de baterías**

También conocido como BMS por sus siglas en inglés (battery management system) están compuestos mediante un hardware y software los cuales son los encargados de realizar la operación de la batería en donde se puede garantizar la seguridad de las baterías y la confiabilidad de la operación de estas.

Ya que este sistema es encargado de realizar la operación de baterías también se ve encargado de supervisar los niveles de corriente y tensión que se manejan, la temperatura, la gestión térmica, etc., para así proteger a la batería y alargar la vida útil de la misma. [3]

- **Controlador**

Este es otro elemento de suma importancia dentro del sistema de almacenamiento ya que es el encargado de comunicarse con los BMS y poder operar en caso de que se presente alguna falla en las baterías, ya sea por aumento de la temperatura o que se encuentre fuera de los valores permitidos de corriente y voltaje, activando los controladores de temperatura o activando los interruptores y protecciones para así evitar que se produzcan fallas más grandes dentro del sistema y puedan tener afecciones permanente. [3]

- **Sistema de protección**

Estos sistemas de protección están compuestos por relés de protección, transformadores de corriente y voltaje tanto en el lado DC como AC del sistema. Estas protecciones ayudan a que el sistema salga de funcionamiento inmediatamente si se produce alguna falla en la barra, dejándolo de esta forma aislado evitando así daños en el BESS. [3]

- **Transformador**

Los transformadores son utilizados para elevar los voltajes que se generan a la salida de los inversores ya que, generalmente, estos son bajos y, depende del uso que vaya a tener el sistema BESS, se necesita un aumento para su correcta aplicación. [3]

- **Obras civiles adicionales**

Este componente depende mucho del proveedor de BESS debido a que, dependiendo de la magnitud de las baterías, las estructuras que se usan para el montaje de este van a variar. Generalmente todos los proveedores ya toman en



que la capacidad para llevar a tener estabilidad en la red ha sido más eficiente en comparación a las plantas térmicas que antes eran las encargadas de realizar este tipo de trabajos. [3]

- **COLLOMBIA**

El proyecto instalado en Colombia cuenta con una potencia instalada de 225 MW para la cual se ha tenido una inversión de alrededor de seis millones de dólares. Estos sistemas BESS tienen una potencia de 7 MW/3,9 MWh las cuales utilizan baterías de ion litio. Con el implemento de este sistema de almacenamiento se ha asegurado que aumentara la confiabilidad del sistema interconectado colombiano brindando flexibilidad y estabilidad este. [3]

- **PERÚ**

El proyecto que se desarrolló en este país hace uso de la tecnología plomo ácido, en donde este dispositivo es de 14 MW/8 MWh con una inversión de alrededor de nueve millones de dólares. Este BESS se ha instalado debido a la necesidad de dar un respaldo a los servicios complementarios de su sistema interconectado, además, al igual que los países anteriores, se cuenta con el apoyo a la estabilidad de la red.

Se tiene pensado instalar sistemas de baterías para aportar con energía a las instalaciones que se encuentran en el sector minero o en el sector industrial con aproximadamente entre 0,5 – 5 MWh. [3]

- **REINO UNIDO**

El sistema de almacenamiento de energía en baterías en este país se ha desarrollado con la tecnología de ion litio con un total de 25MW/12,5 MWh con una inversión aproximada de veinte millones de dólares.

Este sistema de baterías provee al sistema interconectado una solución para solventar la flexibilidad y la velocidad para brindar confiabilidad y estabilidad al sistema de generación eléctrica además de lograr hacer que las plantas de generación tengan un mejor desempeño. [3]

- **ESPAÑA**

Como es común en los anteriores países estudiados, en España se construye un sistema BESS para que este aporte en mejorar la flexibilidad de la central térmica Carboneras para así cubrir con la demanda en todos los periodos. Este proyecto ha tenido una inversión de alrededor de doce millones de dólares utilizando la

tecnología de ion litio. Estas baterías de 20 MW de potencia y 11,7 MWh de capacidad será el mayor proyecto de sistemas de almacenamiento de energía en baterías ubicado en España. [3]

- **ALEMANIA**

Alemania cuenta con dos sistemas BESS en diferentes ciudades que son:

- *Schwerin*

La batería de 5 MW/5 MWh han sido instaladas con el fin que en su operación pueda apoyar en caso de falta de suministro. Como ya es de conocimiento gracias a la rapidez de la respuesta de estos sistemas, en específico en esta central, la regulación de frecuencia que ofrece es similar a la que aportaría una central convencional de 50 MW. Se debe mencionar que el sistema de almacenamiento cuenta con un total de 25 600 celdas que almacenan o inyectan energía a la red. [3]

- *Feldheim*

Es el sistema de almacenamiento más grande que se puede encontrar en Alemania el cual consta con 3 360 módulos con la tecnología ion litio que da una potencia de 10 MW y 10,79 MWh de capacidad. La inversión para este proyecto se ha estimado que se encuentra alrededor de los trece millones de dólares. [3]

- **JAPÓN**

En Japón se tiene varios proyectos que son:

- *NEDO*

En este proyecto se instalaron sistemas de almacenamiento de baterías en conjunto con sistemas fotovoltaicos. El proyecto terminó en el 2006, esto se realizó con el fin de poder evitar que, con la desconexión del sistema fotovoltaico, este no quede aislado además de que los BESS eran operados para poder realizar un control en los niveles de tensión. [3]

- *Parque eólico Rokkasho*

Junto al parque eólico se ha instalado uno de los sistemas de almacenamiento en baterías más grande del mundo de 34 MW/238 MWh el cual fue construido con el fin de producir energía eléctrica independientemente de la operación o no del parque eólico. Utilizando la tecnología de hidruro de sodio (NaS) el sistema tiene

un conjunto de 17 unidades de 2 MW de potencia cada uno los cuales están protegidos debido a que la salinidad del aire puede llegar a producir corrosión en las unidades. La eficiencia para este proyecto se ha estimado que este alrededor del 89-92%. [3]

- *Parque eólico Shiura*

Es un parque eólico que cuenta con un sistema de baterías el cual usa la tecnología de plomo de 4,5 MW para regular la producción del parque. Estos sistemas de almacenamiento conectados al parque eólico han logrado rebajar un 10% de las fluctuaciones que se presentan en este. [3]

- *Parque demostrativo de Yokohama*

Este sistema de almacenamiento de energía de 1 MW/5 MWh y está compuesto por tres unidades de 500, 250 y 250 kW. Tiene la finalidad de brindar estabilidad al parque y tener un buen respaldo para los generadores en las horas cuando la demanda es máxima. De la misma forma que se tiene los beneficios en los parques eólicos, este almacenamiento aporta con una buena respuesta a la regulación de frecuencia tomando en cuenta que los beneficios son independientes de la ubicación en los que se tenga los sistemas de almacenamiento. [3]

- **COREA DEL SUR**

En este país se encuentra el mayor sistema de almacenamiento de energía con un total de 56 MW para regulación de frecuencia. La tecnología que utiliza este sistema es de NCM (Níquel-Manganeso-Cobalto) y LTO (Litio-Titanio-Óxido) de ion litio.

Son un total de tres sistemas de 24, 16, 16 de potencia y una capacidad de 9, 6 y 5 MWh respectivamente. Esta tecnología se la utiliza debido a que ofrece características como la elevada densidad energética, el número de ciclos de operación, las mejoras que ofrece debido a la velocidad en carga y descarga sin dejar de lado las potencias máximas. [3]

## 2 METODOLOGÍA

Para evaluar la factibilidad económica, los modelos de negocio y los beneficios que proporciona el uso de los sistemas BESS, se recurrió a información secundaria la cual está disponible en diferentes publicaciones que tienen información sobre estos sistemas de almacenamiento de energía.

La metodología para el análisis de la implementación del sistema de almacenamiento de energía en baterías a gran escala dentro del SNI ecuatoriano consiste en un análisis documental de forma cuantitativa y cualitativa realizando así un trabajo experimental y explicativo de los diferentes usos que puede tomar un sistema BESS dentro del país.

Se tomo en cuenta los diferentes aspectos:

- Investigación de las razones económicas por las cuales se puede llegar afectar la instalación de sistemas de almacenamiento de energía en baterías.
- Investigación del avance de la tecnología de almacenamiento de energía en baterías a través de los años evaluando la reducción en los costos de implementación de esta.
- Identificación de los diferentes servicios que pueden prestar los sistemas BESS dentro del SNI junto a un análisis económico indicando un precio aproximado que se podría pagar por los servicios prestados.
- Investigación de los distintos modelos de negocio que se pueden aplicar a la instalación de los sistemas de almacenamiento.
- Análisis de los diferentes métodos en los que los sistemas BESS obtienen su remuneración frente a los distintos servicios que estos pueden prestar en el SNI identificando el lugar de ubicación en la que estos sean instalados, que para el presente trabajo, se encontrarían en la generación.

### **2.1 Determinación de los costos y factores que afectan a la viabilidad de la implementación del banco de baterías.**

Para realizar un análisis de la implementación de BESS a gran escala se tiene que tomar en cuenta diferentes aspectos que serían los principales actores que pueden afectar a la viabilidad del proyecto los cuales son: costo de almacenamiento, servicios comerciales y el desarrollo de regulaciones, los cuales se describen detalladamente a continuación. [11]

### 2.1.1 Costo de almacenamiento

Los costos de almacenamiento están ligados a las diferentes tecnologías de sistemas de almacenamiento de energía que se encuentran disponibles en el mercado, de los cuales se tiene que hacer un análisis minucioso para seleccionar el sistema que tenga más eficiencia, menor costo y que su vida útil sea proporcional a los dos indicadores antes mencionados.

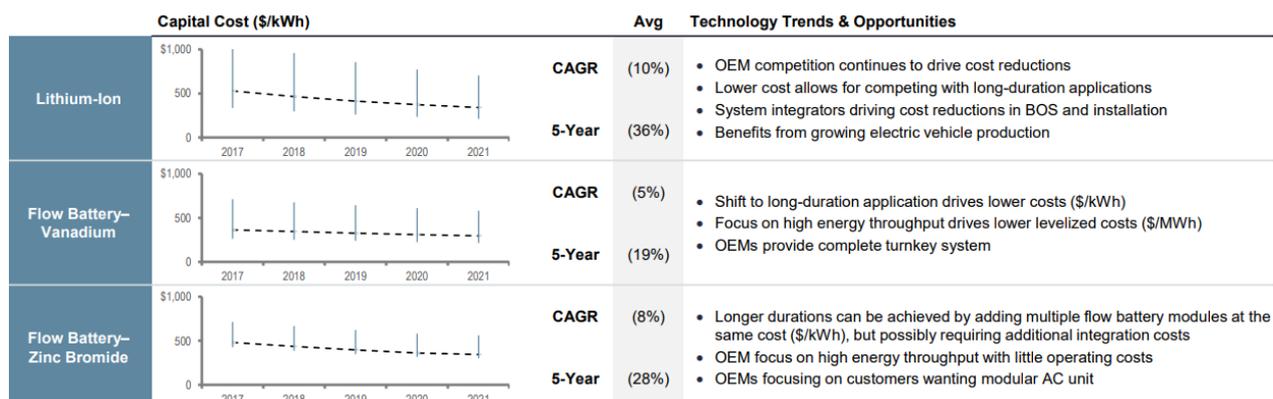
El costo que se toma en cuenta para las diferentes tecnologías de almacenamiento es el costo nivelado de almacenamiento “LCOS” (Levelized Cost of Storage) el cual indica los costos de la electricidad en kWh o MWh descargada de un dispositivo de almacenamiento contabilizando los costos de inversión, de operación, mantenimiento, etc., para cada uno de los diferentes sistemas dependiendo del lugar que ocupará en la red eléctrica. [12]

En el estudio realizado por la firma Lazard en el 2017 se puede encontrar una comparación entre las 3 tecnologías más usadas para un proyecto de 20 años de vida útil, una potencia nominal de 100 MW, energía utilizable de 400 MWh operando durante 350 día al año que se pueden observar en la tabla 3. [13]

**Tabla 3.** Costos de inversión, Costo de O&M y LCOS para el año 2017. [13]

Tipo de Tecnología	Costo de Inversión (USD/kWh)	Costo fijo de Operación y Mantenimiento	LCOS (USD/MWh)	$\eta$
Flow Battery (Vanadium)	<b>\$360 – 819</b>	<b>0.8%</b>	<b>\$209 – 413</b>	<b>67% - 70%</b>
Flow Battery (Zinc-Bromine)	<b>\$492 – 550</b>	<b>0.63% - 0.62%</b>	<b>\$282 – 347</b>	<b>67%</b>
Ion-Lithium	<b>\$385 – 489</b>	<b>0.63%</b>	<b>\$282 – 347</b>	<b>86%</b>

Como se puede observar en la figura 2.5, la firma ha realizado un estudio para 5 años en donde predice que la inversión para la implementación de estas tecnologías seguirá decayendo lo cual es beneficioso para las empresas que quieran hacer uso de esos sistemas de almacenamiento.



**Figura 2.5** Proyección de los Costos de BESS para las Diferentes Tecnologías. [13]

En un estudio realizado en el 2021 de la misma firma, exclusivamente para la tecnología Ion-Litio, se presentaron datos nuevos en donde la inversión para la implementación de estos sistemas se ha reducido y este evento se puede observar en la tabla 4.

**Tabla 4.** Costos de inversión, Costo de O&M y LCOS para el año 2021. [14]

Tipo de Tecnología	Costo de Inversión (USD)	Costo fijo de Operación y Mantenimiento (USD/kWh)	LCOS (USD/MWh)	$\eta$
Ion-Lithium	<b>\$63 – 119</b>	<b>\$1,5 – 2,5</b>	<b>\$113 – 232</b>	<b>91% - 84%</b>

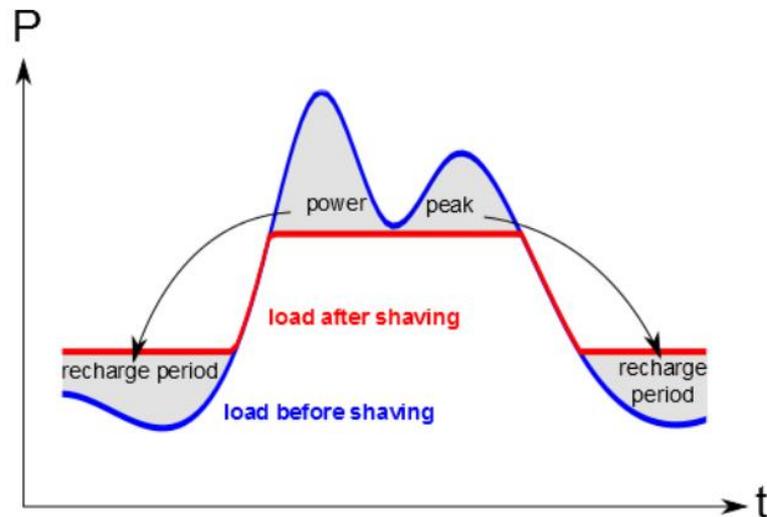
### 2.1.2 Servicios comerciales

Los sistemas de almacenamiento presentan varios beneficios para el sistema nacional interconectado debido a todas las aplicaciones que estos pueden prestar a los diferentes segmentos de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica. Esta variedad de servicios que oferta el almacenamiento de energía al sistema está destinada para aumentar la confiabilidad del sistema eléctrico y la calidad de servicio para los clientes finales. Este estudio está orientado a los servicios que se pueden prestar en la generación de energía eléctrica los cuales se los describe a continuación.

- **Arbitraje de Energía**

El arbitraje de energía consiste en poder beneficiar al sistema de la diferencia de precios que existe en el mercado cuando la demanda esta alta o baja. Los BESS buscarán generar una ganancia cuando se realice una carga de las baterías en el

tiempo en donde la demanda es baja y los precios de la energía es barata y descargar las baterías, vender energía, cuando la demanda es alta y los precios aumentan. [15] En la figura 2.6 se puede observar la curva que representa el arbitraje de energía.



**Figura 2.6** Curva demostrativa del arbitraje de energía. [16]

El cargar o descargar las baterías estará al mando del operador de la red el cual tendrá la potestad de decir cuando el sistema almacena o entrega energía por lo que se puede tener posibles riesgos económicos. [15]

- **Regulación de Frecuencia**

En Ecuador se maneja una frecuencia de 60Hz el cual se tiene que mantener para poder asegurar una correcta calidad del producto eléctrico hacia los usuarios finales. El SNI trabaja dentro de un rango de frecuencia de 59,850Hz como mínimo antes de realizar alivios de carga por baja frecuencia y como máximo 60,150Hz en donde se busca reducir la generación debido a baja demanda. [17] Siempre se debe tener en cuenta que la potencia generada tiene que satisfacer a la potencia demandada más las pérdidas que se puedan producir. [15]

- **Control Primario de Frecuencia (CPF)**

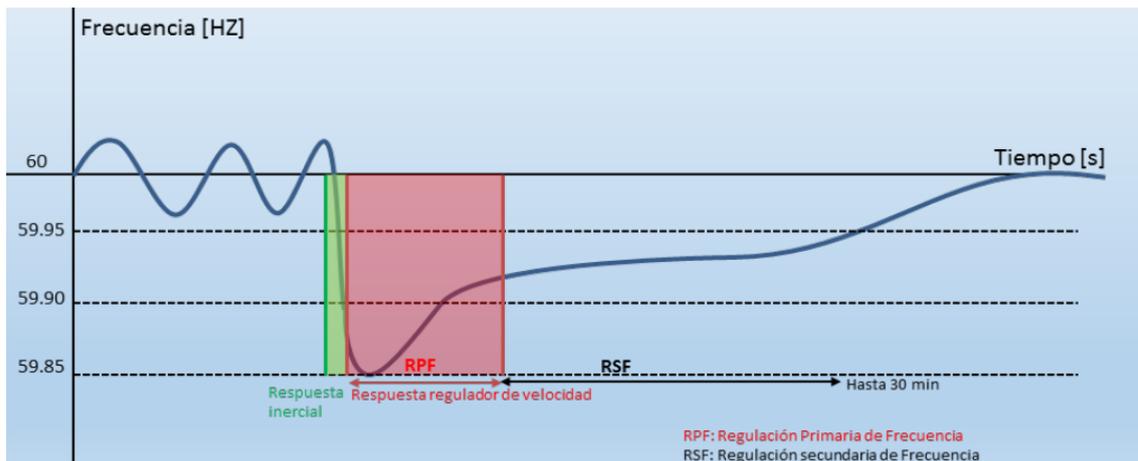
El control primario de frecuencia lo manejan los sistemas de almacenamiento que puedan realizar cambios de forma rápida y automática en la red modificando así los niveles de potencia activa para solventar las desviaciones que se han provocado en el sistema en un tiempo limitado, logrando así mantener al sistema en equilibrio entre la generación y la demanda. El tiempo para realizar la regulación primaria de

frecuencia esta alrededor de los 3 s y 30 s todo dependiendo del tipo de generador que se use. [18]

- **Control Secundario de Frecuencia (CSF)**

El control secundario de frecuencia mantiene la frecuencia lo más cercano a su valor nominal logrando así recuperar la reserva para el control primario de frecuencia cuando ya no se disponga de esta. Este control puede ser activado de forma local automática o mediante un control de generación (AGC Automatic Generation Control). El tiempo de actuación de este sistema se encuentra entre 10 s y 150 s de retardo y tiene un tiempo de respuesta sobre el sistema de entre 1 y 30 minutos. [18]

En la figura 2.7 se presenta un gráfico en donde se puede apreciar cómo funciona el control primario y secundario de frecuencia.



**Figura 2.7** Control Primario y Secundario de Frecuencia. [18]

- **Recuperación del servicio**

Este es el servicio que puede prestar el sistema de almacenamiento en baterías cuando existe la desconexión parcial o total del sistema interconectado realizando el suministro de energía eléctrica en un tiempo corto. Para los sistemas de almacenamiento se tiene dos servicios de mucha importancia que se describen a continuación:

- **Partida Automática (PA):** Se da cuando el sistema de almacenamiento, estando apagado y ante una desconexión, entra en servicio energizando líneas, tomando carga y sincronizándose con el sistema sin tener un servicio de electricidad externo.

- **Aislamiento Rápido (AR)**: Se da cuando el sistema de almacenamiento sigue trabajando, alimentando a los servicios auxiliares de forma aislada tras la desconexión del sistema por un apagón total o parcial del sistema como se explicaba anteriormente.

Los servicios antes mencionados son los principales aportes que puede ofrecer los sistemas BESS en donde la firma Lazard con el estudio realizado en el 2017 establece los costos que se pueden observar en la tabla 5.

**Tabla 5.** Asunción de costos de los servicios prestados por BESS. [13]

<b>Fuente de Ingresos</b>	<b>Descripción</b>	<b>Modelo de Precios</b>	<b>Remuneración Anual (\$/kW-year)</b>	<b>Costos Asumidos</b>
<b>Arbitraje de energía</b>	<p>Precios de energía basado en CAISO (Operador Independiente del Sistema de California) en el 2015.</p> <p>Crecimiento anual del 0.9%</p>	LMP (Límite Máximo Permisible) por hora	\$80,09	
<b>Regulación de Frecuencia</b>	Participación basada en el precio por hora y el estado de carga de la batería	\$7,6/MWh	\$13,64	<p>Sistema AC: \$28/kWh</p> <p>Sistema DC: \$346/kWh</p> <p>EPC (<i>Energy Procurement and Construction</i>): 15%</p> <p>Eficiencia: 85%</p> <p>Costos extras: 3,3% BESS</p>
<b>Recuperación del Servicio</b>	<p>Los montos de pago por confiabilidad (\$/kW-mes) varían según el contrato y no están disponibles públicamente.</p> <p>Las están basadas en costos de tecnología asumidos y otras fuentes de ingresos disponibles.</p>	\$19,83/kW-mo	\$283	

### **2.1.3 Desarrollo de regulaciones**

Se tienen que crear nuevas regulaciones en la que pueda potenciar el almacenamiento de energía baterías a gran escala o crear entornos más favorables para la inversión de estos sistemas en donde se pueda aumentar el valor para la realización de un proyecto mejorando la economía de estos, caso contrario, las regulaciones jugarían un papel que pondrían muy en contra para que se pueda desarrollar este tipo de proyectos. [11]

## **2.2 Análisis económico-financiero de los beneficios de la implementación de los BESS en sistemas eléctricos a gran escala en el SNI ecuatoriano**

Si se habla de los beneficios que trae el uso de las baterías a gran escala como recurso para el almacenamiento de energía eléctrica para la prestación de servicios auxiliares, se puede evidenciar en diferentes reportes, citados en este trabajo, que estos sistemas son mucho más económicos que las máquinas comunes y más amigables con el medio ambiente.

Se puede realizar diferentes estudios económicos de la implementación de estos sistemas dentro de Ecuador dependiendo de su ubicación y los usos que vayan a tomar estos sistemas. En este trabajo se analizará de forma específica cómo ayudarían estos sistemas si se los utiliza para realizar control de voltaje y regulación secundaria de frecuencia dentro del SNI.

### **2.2.1 Estimación de beneficios por regulación secundaria de frecuencia**

Dentro del país se tiene establecido que todas las generadoras tienen que realizar el control secundario de frecuencia, pero existen máquinas que tienen mayor participación y son las principales en actuar frente a este tipo de eventos.

Se ha determinado que la reserva de potencia para RSF en periodos de mínima, media y máxima demanda es de 187,5 MW en donde este control se podrá realizar en orden de prioridad con las centrales hidroeléctricas de Paute, Mazar y Pucará de las cuales al momento lo realiza la central de Paute debido a la capacidad que tiene esta central. [19]

Con esta información se puede determinar los beneficios económicos que se tendría si la regulación secundaria de frecuencia se realizaría con los sistemas

BESS y los megavatios reservados en la central Paute sería despachado en su totalidad.

Es conocido que la central de Paute tiene una generación efectiva de 1 100 MW de los cuales, como se mencionaba anteriormente, se reserva 187,5 MW para realizar la regulación secundaria de frecuencia RSF. Esta reserva de megavatios que se tiene provoca que la central no pueda despachar la energía en su totalidad, por lo tanto, se produce una pérdida económica. Esta pérdida es la que se quiere evitar instalando los sistemas BESS, los cuales reservarían la potencia indicada y dejarían libre a la central para que pueda realizar el despacho de toda su energía.

Basándonos en los datos obtenidos del informe anual del Operador Nacional de Electricidad – CENACE del año 2017 se puede realizar este estudio analizando la energía vendida y los ingresos obtenidos en contratos regulados de cada mes para todo el año 2017.

En la tabla 6 se puede observar los ingresos por energía vendida mediante contratos regulados y en la tabla 7 se puede observar los datos de la energía vendida en GWh.

**Tabla 6.** Ingresos por energía vendida mediante contratos regulados (Millones de USD). [20]

Empresas Generadoras	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
CELEC EP Hidropaute	12,49	12,64	12,93	13,03	12,97	12,75

continuación

Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
12,67	12,61	12,25	12,49	12,28	12,28	151,28

**Tabla 7.** Energía vendida mediante contratos regulados (GWh). [20]

Empresas Generadoras	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
CELEC EP Hidropaute	487,5	528,07	706,09	765,73	779,13	712,98

continuación

Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
701,53	678,63	513,88	637,76	515,67	470,35	7 497,37

Si se realiza una división entre los datos presentados en la tabla 6 y en la tabla 7 se obtiene el costo marginal mensual que se genera. Este costo se lo puede observar en la tabla 8.

**Tabla 8.** Costo marginal mensual (ctvs.USD/kWh).

Empresas Generadoras	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
CELEC EP Hidropaute	2,56	2,39	1,83	1,70	1,66	1,79

continuación

Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
1,81	1,86	2,38	1,96	2,38	2,61	2,02

El total de esta energía que se observa en la tabla 7 está contemplando la reserva de los 187,5 MW mencionados por lo cual si estos fueran tomados en cuenta se obtendría el total que se puede observar en la tabla 9.

**Tabla 9.** Energía vendida mediante contratos regulados considerando el despacho sin reserva de energía (GWh).

Empresas Generadoras	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
CELEC EP Hidropaute	622,5	663,07	841,09	900,73	914,13	847,98

continuación

Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
836,53	813,63	648,88	772,76	650,67	605,35	9 117,32

Considerando que se mantiene el costo marginal, este valor, de la tabla 8, se lo multiplica para los nuevos valores obtenidos de energía vendida mediante contratos regulados de la tabla 9 y los resultados de la energía vendida por contratos regulados en millones de dólares se los puede observar en la tabla 10.

**Tabla 10.** Energía vendida mediante contratos regulados considerando el despacho sin reserva de energía (Millones de USD).

Empresas Generadoras	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
CELEC EP Hidropaute	15,95	15,87	15,40	15,33	15,22	15,16

**continuación**

Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
15,11	15,12	15,47	15,13	15,49	15,80	185,06

Como se puede observar, existe un incremento muy representativo si el almacenamiento que se tenía previsto para la regulación secundaria de frecuencia es despachado totalmente, esta diferencia se muestra en la tabla 11 (*diferencia de ingreso = ingreso de energía sin reserva – ingreso de energía con reserva*) en donde el total de ingresos que se obtendría supera en 33,67 millones de dólares al total de ingresos si se despachase la energía manteniendo la reserva, por lo tanto, sería un beneficio económico que presentaría el uso de los sistemas BESS.

**Tabla 11.** Ingresos por energía vendida mediante contratos regulados sin considerar la reserva de energía (Millones de USD).

Empresas Generadoras	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
CELEC EP Hidropaute	3,46	3,23	2,47	2,30	2,25	2,41

**continuación**

Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
2,44	2,51	3,22	2,64	3,21	3,52	33,67

### 2.2.2 Estimación de beneficios por control de voltaje

Hablando un poco de la parte ambiental se puede discernir fácilmente que el uso de baterías reduciría la contaminación que se produce al utilizar los combustibles fósiles ya que todas esas emisiones de gases tóxicos y CO2 dejarían de producirse, además de que, todos los materiales que se utilizan para fabricar una batería pueden recuperarse y reutilizarse para producir unas nuevas.

Ecuador cuenta con varias máquinas que funcionan a gas o vapor en donde, para los fines del trabajo, se toma el caso de participación de estos generadores como controladores de voltaje dentro del SNI y se estudia los beneficios que traería su

reemplazo con los sistemas BESS referente al tema de costos de operación y mantenimiento.

Los principales generadores que realizan el control de voltaje dentro del SNI ecuatoriano son las maquinas Gonzalo Cevallos de CELEC-EP las cuales son de vapor y de gas con una potencia efectiva de 145 MW y 20 MW respectivamente. En la tabla 12 se puede apreciar los costos de operación y mantenimiento de estas centrales.

**Tabla 12.** Costos de O&M y generación bruta. [21]

Central	Tecnología	USD	Potencia
		Costos O&M	MWh
Gonzalo Cevallos	Vapor 1 (FOIL)	8 299.813,36	2 135,808
	Vapor 2 (FOIL)	11 398.688,94	2 163,720
	Gas (DIESEL)	1 056.870,75	119,040

Si se suman los costos de operación y mantenimiento de cada una de las máquinas se obtiene un total de 20 755.373,50 USD.

Tomando en cuenta los datos de la tabla 4 se tiene que, en un escenario pesimista, aproximadamente el costo de operación y mantenimiento para un sistema BESS con una capacidad de 4 000 MWh se calcula multiplicando el costo de O&M que es de 2,5USD/kWh para la capacidad ya mencionada obteniendo un total de:

$$O\&M = 4\ 000\ MWh * 2,5 \frac{USD}{kWh} * 1000 \frac{kW}{MW}$$

Ecuación 1.

$$O\&M = 10\ 000.000,00\ USD$$

Donde se puede calcular que aproximadamente existe una diferencia de 10 755.373,50 USD lo que representaría un ahorro significativo debido a los costos de operación y mantenimiento a favor de los sistemas BESS

Otras máquinas encargadas de realizar el control de voltaje son las máquinas de Santa Rosa que en total son 3 y los datos se los puede observar en la tabla 13.

**Tabla 13.** Costos de O&M y generación bruta. [21]

Central	Tipo	USD	Generación Bruta
		Costos O&M	MWh
Santa Rosa	DIESEL	6 000.000,00	408
	DIESEL	6 000.000,00	408
	DIESEL	6 000.000,00	408

Sumando el total de los costos de operación y mantenimiento de las generadoras de Santa Rosa se tiene un total de 18 millones de dólares.

Utilizando la misma ecuación 1 se sabe que el costo de O&M para una central de 1 200 MWh es de:

$$O\&M = 1\,224\text{ MWh} * 2,5 \frac{\text{USD}}{\text{kWh}} * 1\,000 \frac{\text{kW}}{\text{MW}}$$

Ecuación 2.

$$O\&M = 3\,060.000,00\text{ USD}$$

De los resultados obtenidos se puede observar que si se instala un sistema BESS con la misma capacidad de generación bruta que las 3 unidades de Santa Rosa juntas se tiene un ahorro de 15 millones de dólares en costos de operación y mantenimiento, dejando en evidencia que se tendría un beneficio al usar los sistemas de almacenamiento de energía en baterías a gran escala.

Como se puede observar tanto en el ahorro de costos de operación y mantenimiento en las centrales que realizan control de voltaje y despachando la energía que se tenía reservada para la regulación secundaria de frecuencia se obtienen datos positivos que podrían indicar que es una opción viable la implementación de los sistemas BESS en el SNI.

Es preciso mencionar que para tener datos más específicos y detallados de los beneficios económicos que pueden presentar la implementación de los sistemas BESS, es necesario realizar simulaciones para un periodo de tiempo considerable en donde se pueda comprobar el comportamiento positivo de estos sistemas a largo plazo dentro del SNI.

## **2.3 Estudios de los modelos de negocio para la implementación de un sistema de almacenamiento en banco de baterías a gran escala**

Los inversionistas que están dispuestos a realizar un proyecto como el almacenamiento de energía en baterías a gran escala, deben garantizar de que el proyecto tenga la capacidad de brindar la confiabilidad y la seguridad adecuada al sistema en donde, cumpliendo con estos parámetros, pueda obtener una remuneración adecuada con la cual pueda recuperar su capital de inversión y obtener ganancias por los servicios prestados.

Por lo explicado, se pueden establecer tres tipos de modelo de negocio de los cuales se realizará una descripción en donde se identificará como puede ser remunerado un inversionista que desee implementar un BESS.

### **2.3.1 Modelos de negocios**

- ***Modelos comerciales de costo de servicio:***

Este modelo de negocio está presente en entornos de servicios públicos integrados verticalmente, en la cual puede reconocer el almacenamiento de energía dentro de su plan de expansión, y/o entornos de servicios públicos de distribución, en donde se puede integrar esta tecnología como parte de su infraestructura, en ambos casos, generalmente, están supervisados por los reguladores estatales. [22] [23]

Estos reguladores, para el modelo de negocio en entorno de servicios públicos de distribución, están encargados de observar que tipos de servicios son prestados ya que, por ejemplo, si se usa para el alivio de las líneas de transmisión el servicio no es permitido debido a que se estaría considerando como un activo más participando en la remuneración a la empresa transmisora. En cambio, si se utiliza el almacenamiento de energía para mejorar la confiabilidad, seguridad o calidad para realizar un aplazamiento en las inversiones en sub-estaciones este será permitido con la condición de cumplir con ciertas normativas que serían establecidas por el país. [23]

La empresa de servicios públicos obtiene de esta forma una tasa de rendimiento la cual está regulada sobre las inversiones de capital logrando así recuperar los costos operativos que tiene que ver con el combustible, energía comprada, mantenimiento, etc., sobre la base de recuperación de costos, esta tasa de recuperación puede

estar ligada y ajustada a la confiabilidad que pueda prestar el servicio u otros factores. [22]

En resumen, el inversionista obtiene una remuneración que está basada en la obtención del capital invertido y los costos de operación, mantenimiento y compra de energía a cambio de mantener la disponibilidad del sistema de almacenamiento de energía el cual es considerado como un activo en la red de transmisión y distribución. Para estos modelos mencionados se debería generar regulaciones apropiadas, en donde se pueda identificar remuneraciones adecuadas para que la puesta en marcha de proyectos de almacenamiento de energía sea viable para cada uno de los inversionistas. [23]

- ***Modelo de participación en mercados mayoristas:***

Este modelo considera la participación y competencia dentro de mercados liberalizados dentro de los cuales está basado típicamente el arbitraje de energía y la prestación de servicios auxiliares en donde este último es el más interesante e importante para tomar en cuenta en este tipo de modelos de negocios. [22]

Para el arbitraje de energía se tiene que realizar el análisis en donde se establece si el almacenamiento de energía es controlado total o parcialmente por el operador.

Si el almacenamiento es controlado totalmente por el operador se tiene que él es el principal actor y el que toma riesgos sobre la carga y descarga de la energía de las baterías, caso contrario, si es parcialmente controlado, el riesgo de la operación viene a ser determinado por un pronóstico adecuado de la demanda. [22] [23]

Por parte de los servicios auxiliares se tienen que especificar qué tipo de servicios van a prestar y se analiza si el sistema de almacenamiento de energía participara como una generación independiente o para asociarse y complementar la operación de otro generador.

En este punto es en donde entra en juego la decisión de la tecnología a usar, la cual debe ser la que mejor se acople y tenga las mejores características para los servicios que se especificarían. [23] [24]

- ***Detrás del medidor:***

Para este modelo de negocio se tienen dos visiones que puede tener el usuario final, que es el que puede adaptar esta forma de negocio, las cuales son el de aprovechar el recurso de la propia generación para gestionar así la demanda o

mejorar el suministro eléctrico o decidir si participar en los mercados mayoristas como cierto proveedor para ayudar a la respuesta de la demanda, proveedor de servicios auxiliares, como recurso para eliminar picos de demanda o como un mercado energético en tiempo real. [22]

Para el segundo caso el consumidor deberá apegarse a las regulaciones y las normativas que se manejen en el país en donde se establecen los precios que tiene el consumo de electricidad, al igual que se tiene que analizar las condiciones y remuneraciones de la generación distribuida. [22] [23]

Como se mencionó al inicio de esta sección del capítulo los modelos de negocio son establecidos para que una empresa logre obtener una remuneración adecuada por los servicios prestados.

En este contexto, para que una empresa logre obtener los beneficios esperados, se tiene que analizar tres conceptos los cuales son: como los servicios que la empresa ofrece van a resolver las distintas necesidades del sistema, como se va a proveer este servicio y como va a ser remunerado.

Se debe tener cuidado al momento de analizar los distintos servicios que puede prestar una empresa ya que estos, dependiendo de los sectores, pueden estar regulados o desregulados en el mercado con lo que afecta también a la forma en la que el servicio es proveído.

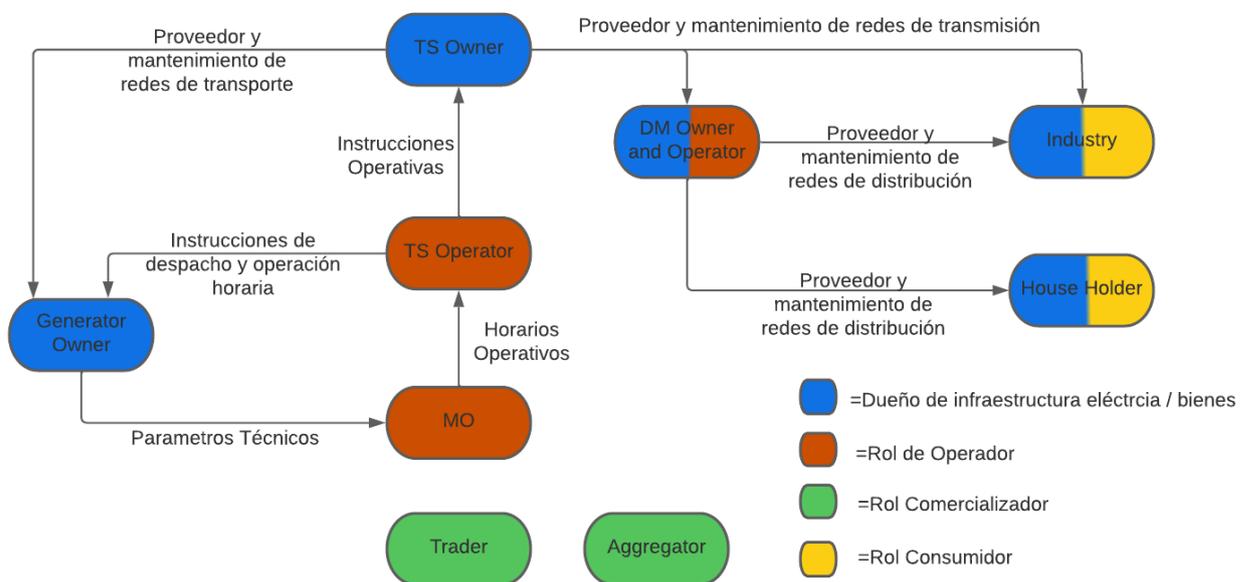
Debido a los distintos modelos de negocio antes mencionados, diferentes enfoques son analizados en donde cada uno de estos dependerá de los actores que están involucrados y de que objetivos quiere cumplir la empresa como la minimización de costos, maximizar la utilidad, etc. A continuación, se encuentra una lista de los principales actores que se pueden encontrar en el sector eléctrico:

- **Generator Owner:** Dueño de las instalaciones de generación eléctrica
- **TS Owner:** Dueño de la red de transmisión
- **TWS Operator:** Dueño del sistema de transmisión
- **Market Operator (MO):** Operador del mercado
- **Trader:** Es el rol comercializador el cual tiene la capacidad de comprar o vender productos, energía o servicios complementarios
- **DN Owner and Operator:** Dueño y operador de la red de distribución

- **Aggregator:** Tiene la capacidad de proveer servicios complementarios siendo un actor intermediario entre los consumidores y el operador del sistema
- **Industry:** Grandes consumidores
  - **House Holder:** Consumidores residenciales

[22] [23]

En la figura 2.8 se puede observar una interacción entre todos los actores mencionados anteriormente en donde cada uno está identificado según sus roles y sus principales características.



**Figura 2.8** Actores del mercado y sus roles respecto a la operación del sistema.

### 2.3.2 Enfoques de los Modelos de Mercado

- **Enfoque desde el consumidor**

Debido al aumento de la demanda que se produce año por año en el sistema interconectado se tiene que realizar nuevas expansiones del sistema de generación y realizar trabajos para reforzar las redes tanto de transmisión como distribución.

En este punto es donde se puede considerar al consumidor como una fuente importante el cual puede brindar flexibilidad a la red ya que, este podría optar por manejar su propia demanda buscando así reducir los gastos por el consumo de la energía eléctrica al estar conectado en la red nacional. [23]

Partiendo de esta idea se puede observar que el consumidor debe realizar el análisis de los tres conceptos hablados anteriormente.

El consumidor podría solventar el problema de gestionar su propia demanda y realizar aportes a la red de energía y potencia los cuales estarían manejados por el operador de la red.

El servicio que este proveería es el de manejar su propia calefacción de agua, carga de vehículos eléctricos, etc., con el objetivo de realizar una minimización en los costos y, de ser necesario, puede colaborar al sistema reduciendo los alivios de carga y mejorando en aspectos como la seguridad y la calidad del servicio eléctrico. [22]

Por último la remuneración que tendrían los consumidores estaría ligada a base de tarifas en donde este actor pueda recuperar la inversión realizada por los servicios prestados.

Para este tipo de enfoques, en general, el consumidor tiene que estar asociado con un comercializador el cual pueda presentar las tarifas en donde se realizara si estas son o no aptas para el beneficio del consumidor.

Los residenciales pueden optar por buscar tarifas reguladas las cuales deben tener una ley estable en donde se pueda encontrar los diferentes servicios que el consumidor puede ofrecer a cambio de un beneficio o, de ser consumidores más grandes, pueden optar por un PPA (Power Purchase Agreement) que consta en realizar contratos de compraventa de energía a largo plazo. [23]

Con los modelos de negocio explicados al inicio de este capítulo, se puede optar, por lo explicado anteriormente, al modelo detrás del medidor en donde el consumidor decide si realizar o no una inversión en el almacenamiento de energía dependiendo de las necesidades que tenga como ya mencionamos el minimizar los alivios de carga mejorar temas de la seguridad y calidad, etc., y de las tarifas con las que cuente las cuales pueden ser:

- **Net-billing:** Conocida como generación distribuida, es un sistema el cual permite la generación de energía en base a energías renovables no convencionales, entregando el derecho a los usuarios de poder realizar ventas de la energía excedente que produzcan a una distribuidora y estos sean remunerados en base a un precio regulado establecido por esta misma empresa distribuidora.

- **Net-metering:** Es la medición neta que se realiza a los consumidores en la cual se logra apreciar la cantidad de energía que entra al consumidor y la energía que este aporta a la red. En resumen, se tiene un medidor bidireccional en donde se puede observar cuando se consume más de lo que se genera o cuando se produce más de lo que se consume, en donde al final del periodo se obtiene el total de energía y se determina si el usuario es remunerado por la energía prestada o este debe cancelar cierto valor por la energía consumida.
- **Feed-in tariff:** Es una remuneración que incentiva a la inversión en tecnologías de energía renovable ofreciendo contratos a largo plazo a los inversionistas. Esta remuneración varía dependiendo del tipo de fuente de energía renovable que por lo general es mayor para la energía eólica y solar que para la mareomotriz.

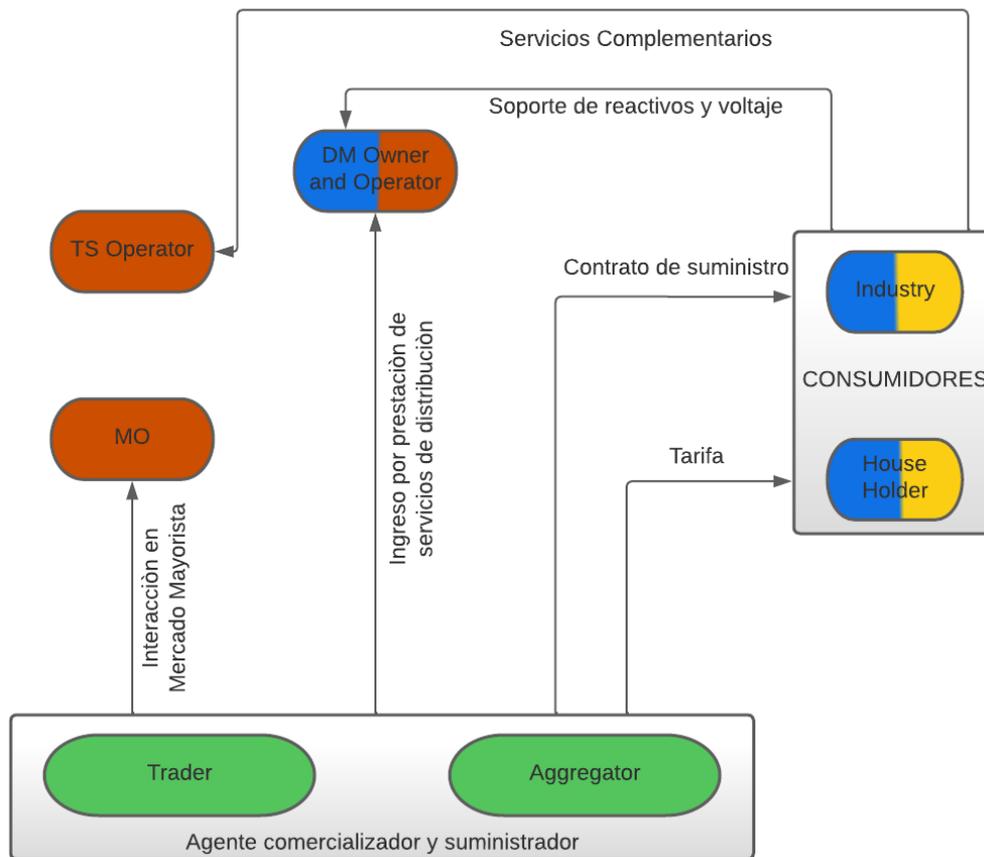
[22] [23]

Por lo explicado anteriormente el consumidor puede tener una buena viabilidad en su proyecto si este tiene una interacción adecuada entre consumidor-agregador.

Se puede optar por un mercado retail, el cual es un mercado minorista en donde la venta al por menor se da de forma directa entre la distribuidora y el consumidor, aunque, a pesar de que este tipo de mercado y las tarifas reguladas se manejan de la misma forma con precios bajos de energía, el mercado retail presenta menos complicaciones, tiene un menor grado de complejidad para que los inversionistas puedan innovar en nuevos modelos de negocios.

Para los clientes de mayor consumo, esto se maneja de forma similar, minimizando los costos, maximizando la calidad y seguridad del servicio eléctrico y solventando problemas con el alivio de carga para que sus actividades no sean detenidas. [23]

En la figura 2.9 se puede observar la interacción que tiene cada uno de los actores dentro del enfoque desde el consumidor.



**Figura 2.9** Participación en el mercado de los diferentes actores dentro del enfoque desde el consumidor.

- **Enfoque desde el generador**

La generación en algunos países se da de forma privada en donde el objetivo principal de estos es el de poder maximizar los ingresos a partir de los servicios que estos generadores presten y es ahí en donde los inversionistas deben asegurarse de que sus proyectos puedan brindar la mayor cantidad de servicios posibles para que de esta forma puedan participar de una forma más activa dentro del mercado.

Se debe tener en cuenta que, en una operación económica descentralizada y desregulada las empresas tienen que entrar en competencia dentro de un mercado mayorista, en donde tienen que analizar diferentes eventos para poder así crear una oferta la cual puede ser aceptada o rechazada, a diferencia de las operaciones coordinadas y reguladas en donde su participación está dada en las propias inversiones. [23]

Refiriéndose nuevamente a los tres conceptos explicados, las empresas generadoras tienen que analizar los siguientes aspectos:

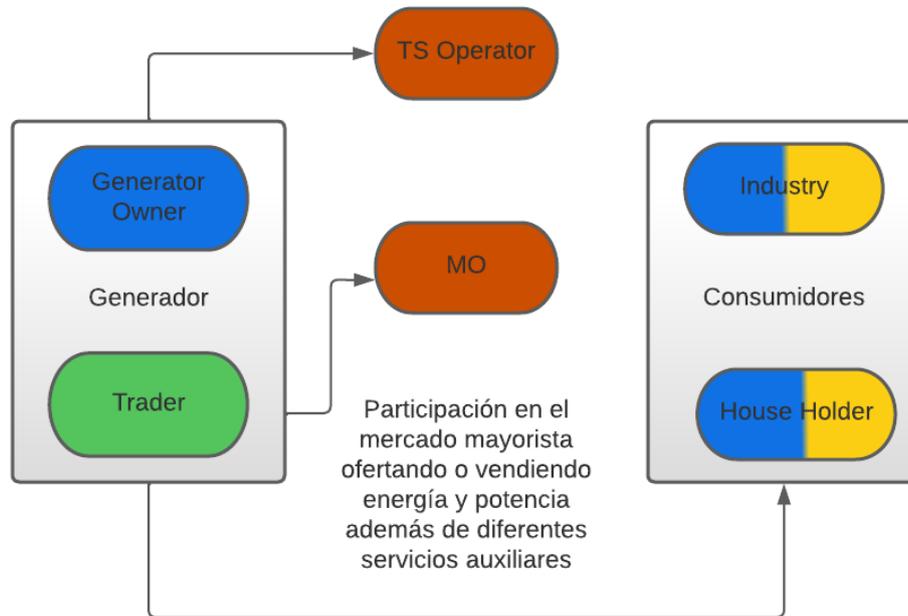
Los servicios de almacenamiento pueden solventar problemas realizando aumentos en la penetración renovable en un sistema eléctrico, esto quiere decir que busca la inversión en energía renovable no convencional debido a la idea de las empresas en participar en mayor grado con recursos renovables y a la inversión que esta implica. [22] [23]

Los servicios que los BESS aportarían al sistema nacional interconectado son muy variados en los cuales se pueden encontrar la capacidad de estos para abastecer la demanda de un país, manejar diferentes bloques de energía, además de la prestación de servicios auxiliares como el seguimiento de carga, la regulación primaria y secundaria de frecuencia, control de voltaje y puede aportar también a la seguridad de los servicios como puede ser el arranque en negro y la estabilidad del rotor.

La forma en la que el almacenamiento de energía tendería una remuneración va a estar sujeta a las decisiones que se tenga por parte del actor suministrador debido a los objetivos que este desea cumplir los cuales pueden ser, el maximizar las utilidades o la de minimizar riesgos financieros por el incumplimiento que se pueda dar en los contratos que se han establecido. [23]

En este enfoque es en donde entran todos servicios complementarios que se hablaron en el subtema de servicios comerciales (3.3.2 de este trabajo) como el arbitraje de energía, la regulación primaria y secundaria de frecuencia y la recuperación del servicio. [23]

En la figura 3.0 se puede observar una gráfica de la interacción que se tiene entre los diferentes actores del mercado eléctrico enfocado desde el generador.



**Figura 3.0** Participación en el mercado de los diferentes actores dentro del enfoque desde el generador.

- **Enfoque desde el operador de la red**

Para poder estudiar este enfoque, se tiene que realizar un análisis sobre el tipo de infraestructura que se maneja dentro del país, en el caso de Ecuador, la transmisión y generación es pública y la operación de la red es comandada por el ente estatal CENACE.

Saber si el almacenamiento de energía en banco de baterías a gran escala está considerado como una fuente de generación o una fuente de recurso extra para aportar flexibilidad del sistema debe estar definido dentro de las regulaciones.

Para este modelo de negocio se tiene que analizar los mismos tres aspectos que se han ido tratando en los diferentes enfoques mencionados.

Se puede realizar aportaciones para cumplir con las normas de calidad, seguridad y confiabilidad que sean establecidas dentro del país, esto se puede dar tanto en la transmisión como en la distribución.

El servicio puede ser creado para poder realizar control de voltaje, frecuencia, apoyar en las perturbaciones que se presenten en el sistema, alivio de flujos de potencia y otros servicios complementarios.

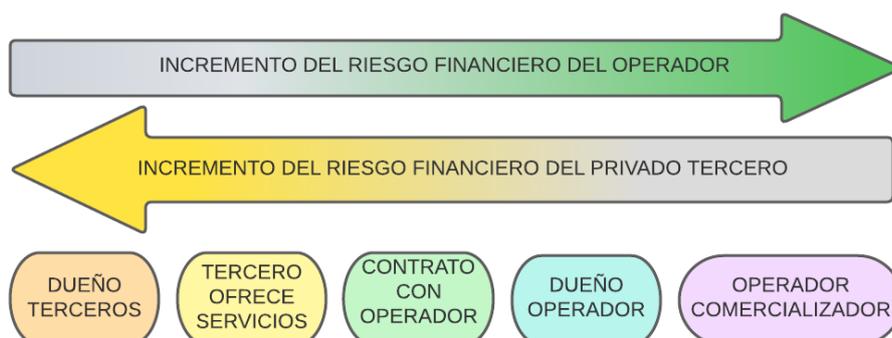
El objetivo de estos sistemas es el de minimizar los costos de operación sin olvidar y dejar de lado la calidad y la seguridad del servicio, además, se puede tener un

aumento en la vida útil de las líneas de transmisión, aplazar inversiones que se tengan dentro del SNI obteniendo así una remuneración para realizar el aporte en servicios complementarios. [22] [23]

Para el enfoque mencionado se tiene que considerar ciertas categorías de modelos las cuales pueden ser aplicadas y estas son:

- **Dueños terceros y tercero ofrece el servicio:** Se tiene que analizar al sistema por parte del operador y, en donde presente más inconvenientes, se establece la necesidad de la inversión en el sistema de baterías el cual llega a controlar y afirmar la seguridad y calidad del sistema.
- **Contrato con operador de red:** En este modelo, el operador es el dueño total del almacenamiento en donde un tercero tiene la posibilidad de poder realizar contratos en donde se propone la posibilidad de usar el BESS y entrar en el mercado mediante ofertas de energía o servicios complementarios.
- **Dueño operador:** De igual forma que el modelo anterior, el operador es dueño del sistema de almacenamiento en donde este será remunerado mediante las regulaciones que hayan sido establecidas en el país.
- **Operador comercializador:** De la misma forma, el operador es el dueño del sistema de almacenamiento en donde será el responsable para realizar una minimización de costos operativos, y obtener una remuneración realizando un correcto uso del BESS, igual que el *contrato con operador de red*, puede participar en el mercado de energía y en ofertar los servicios complementarios. [23]

En la figura 3.1 se puede apreciar el riesgo que se corre en cada uno de los diferentes modelos.



**Figura 3.1** Riesgo para tomar en cuenta sobre los diferentes modelos de negocio dentro del enfoque desde el operador de la red.

## **2.4 Análisis de la factibilidad económica de la implementación de sistemas de almacenamiento en banco de baterías a gran escala en el SNI ecuatoriano**

La operación de las unidades de generación eléctrica del país de Ecuador ya sean hidráulicas, térmicas, eólicas, a gas, Diesel o que posean cualquier tipo de tecnología de generación son supervisadas por un solo ente el cual es el Operador Nacional de Electricidad – CENACE.

Este operador es el encargado de realizar los despachos de energía eléctrica de todas las centrales de generación hora por hora durante todo el año para satisfacer la demanda hora por hora del país. Es decir, CENACE es el encargado de indicar cuanta energía tiene que generar cada una de las centrales eléctricas del país para satisfacer la demanda durante las 8760 horas del año.

Estos despachos de energía eléctrica se los realiza tomando en cuenta como parte fundamental los costos de generación de la electricidad ya que no es lo mismo generar energía mediante recursos renovables como son las generadoras hidráulicas que operando un generador que funciona consumiendo galones de gasolina.

El despacho económico es realizado mediante varios softwares de simulación los cuales muestran los resultados más convenientes que sirven al operador para que pueda tener una visión de cómo debería indicar que sea realizado el despacho de las diferentes centrales de generación de electricidad del país.

Como se mencionó anteriormente, para realizar la regulación secundaria de frecuencia, el operador debe tomar en cuenta que se debe reservar cierta cantidad de megavatios para que en el caso de que ocurra un evento que cause una oscilación en la frecuencia del sistema nacional interconectado se lo pueda solucionar rápidamente sin tener que realizar alivios de carga ya que esto es perjudicial para la población ecuatoriana.

Si el mencionado servicio de RSF es realizado por otro tipo de tecnología, esta reserva de megavatios podría ser despachada y así se podría obtener un ingreso extra por la venta de esta energía.

La energía que se genera a cada hora en el país tiene un costo, el cual es denominado costo marginal de energía horaria. Este costo es lo que cobra cada una de las centrales de generación por cada megavatio hora que es despachado.

Para poder realizar un análisis de la factibilidad económica de la implementación de los sistemas BESS, se tiene que realizar un cálculo muy similar al del literal 1.4.4.1 con la diferencia que se tomará el costo marginal por hora de generación durante todo un año y se lo multiplicara por los megavatios que se tienen para la reserva secundaria de frecuencia que, para el año 2020, se ha determinado que es de 200 MW. En este cálculo se está asumiendo que el banco de baterías estaría cumpliendo con este servicio auxiliar de realizar la reserva secundaria de frecuencia por lo cual, los 200 MW se los podría vender al costo marginal horaria para todos los días del año.

La información de los ingresos que se obtendrían por mes en el año 2020 se puede observar en la tabla número 14.

**Tabla 14.** Ingresos en USD por mes del año 2020.

<b>MES</b>	<b>INGRESOS EN USD</b>
<b>ENERO</b>	\$ 368 357,80
<b>FEBRERO</b>	\$ 2 139.826,00
<b>MARZO</b>	\$ 1 054.002,20
<b>ABRIL</b>	\$ 288 000,00
<b>MAYO</b>	\$ 297 600,00
<b>JUNIO</b>	\$ 306 285,40
<b>JULIO</b>	\$ 323 855,40
<b>AGOSTO</b>	\$ 347 794,13
<b>SEPTIEMBRE</b>	\$ 288 000,00
<b>OCTUBRE</b>	\$ 2 901.495,41
<b>NOVIEMBRE</b>	\$ 7 260.179,70

<b>DICIEMBRE</b>	\$ 3 461.760,89
<b>Total</b>	\$ 19 037.156,93

Como se puede observar en la tabla anterior, el ingreso por mes es bastante representativo. Si realizamos un cálculo total de los ingresos que se obtendrían por realizar el despacho de los 200 MW que se tienen reservados para la regulación secundaria de frecuencia se puede observar que el ingreso anual para el año 2020 hubiera sido de 19 millones de dólares extra a lo que se había generado para ese año.

Se debe mencionar que para realizar este análisis se utilizaron datos del Operador Nacional de Electricidad – CENACE los cuales no pueden ser revelados al público.

### 3 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 3.1 Conclusiones

- Se puede observar que con el pasar de los años los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica han ido evolucionando de forma acelerada lo cual es un punto a favor para el mundo ya que cada vez se tienen mejores tecnologías para ser aplicadas en los sistemas de almacenamiento lo cual mejoraría la eficiencia de estos.
- Se logró comprobar que los sistemas de almacenamiento tienen varias aplicaciones en diferentes áreas, en donde dependería de la persona inversionista que desea utilizar estos sistemas el uso que se le daría a los ESS.
- Se logró estudiar los diferentes tipos de tecnologías con las que son fabricadas las baterías a gran escala y los componentes de los sistemas BESS como los transformadores, convertidores, sistemas de protección, etc., que son fundamentales para una operación segura y confiable de estos sistemas de almacenamiento.
- Alrededor del mundo se puede apreciar que los sistemas de baterías son cada vez más usados debido a los beneficios que estos presentan y se puede observar que con el pasar de los años estos sistemas seguirán aumentando ya que los costos de inversión serán cada vez más baratos.
- Gracias a los estudios realizados por las diferentes empresas productoras de sistemas de baterías a gran escala y a los países que han puesto en marcha el desarrollo de los sistemas BESS se puede concluir que es una tecnología viable la cual puede ser instalada dentro de nuestro país para satisfacer diferentes necesidades de este como la regulación secundaria de frecuencia y el control de voltaje dentro del SNI.
- De todas las tecnologías que se puede encontrar para desarrollar las baterías, se puede observar que la tecnología ion-litio es la más beneficiosa debido a sus características de almacenamiento, eficiencia, vida útil, costos de operación y mantenimiento etc., además, de que su costo con el paso de los años va reduciéndose, haciendo más viable su implementación.
- Se puede concluir que los sistemas de almacenamiento en baterías a gran escala son de gran utilidad debido a los diferentes servicios que estos pueden aportar al

sistema nacional interconectado como la regulación primaria y secundaria de frecuencia, arbitraje de energía, recuperación de servicio y control de voltaje.

- En el desarrollo del capítulo 3, numeral 3.2, se puede concluir que el reemplazo de los generadores convencionales con un sistema de almacenamiento en baterías es beneficioso para el sistema debido a que se puede generar un ahorro en el costo de operación y mantenimiento de este tipo de tecnologías a comparación de la generación térmica que existe dentro del SNI.
- Se puede concluir que, si la regulación secundaria de frecuencia es realizada por los sistemas de almacenamiento, se produce un incremento en los ingresos que se obtendrían al despachar toda la energía reservada en la central hidroeléctrica de Paute para satisfacer la demanda que se presenta en el país.
- Gracias a los diferentes modelos de negocio que existen para la implementación de sistemas BESS es posible analizar el que mejor se adapte para el servicio que se va a prestar y así poder aplicarlo dentro del país sin dejar de lado la capacidad de brindar confiabilidad y seguridad al sistema.
- Se puede concluir que, con los diferentes modelos de negocio ya establecidos e identificados para cada uno de los diferentes servicios que se pueden prestar, se conoce la forma en que los sistemas serán remunerados.
- Dentro del SNI se puede concluir que el desarrollo de los sistemas BESS es útil para el desarrollo de la generación de electricidad del país debido a que estos pueden tomar la responsabilidad de realizar control secundario de frecuencia, control de voltaje y solventar problemas de sobrecargas lo cual permite a otras generadoras poder despachar toda la energía que puedan si tener que realizar ninguna reserva.

### **3.2 Recomendaciones**

- Se puede realizar un estudio económico más a profundidad sobre el desarrollo de un proyecto de sistemas BESS contemplando factores como el transporte de los bancos de baterías, la instalación, el refuerzo de la red y otros temas que puedan encarecer la inversión en estos proyectos.
- Se podría realizar un análisis a futuro que contemple unos 5 años para observar los diferentes beneficios que aportaría el instalar sistemas de baterías dentro del SNI y

así poder determinar de mejor manera la viabilidad de implementación de estos sistemas.

- Se podría realizar un análisis sobre la factibilidad económica en relación con temas ambientales si se desea reemplazar generación con combustibles fósiles con los sistemas de almacenamiento en baterías a gran escala y verificar los beneficios que aportaría como una fuente de recurso renovable.
- Se podría realizar una simulación en softwares como el SDDP o NCP, los cuales realizan un despacho económico, para ver de mejor manera como se comportaría el sistema si la regulación secundaria de frecuencia lo hacen las baterías y ya no se tiene esa reserva para los generadores de Paute y así analizar de mejor manera el incremento económico que se tendría con la simulación de estos eventos.
- Se puede realizar un estudio de las regulaciones en conjunto con los modelos de negocio para poder observar cual de estos modelos y que diferentes enfoques podrían ser el más adaptable para poder iniciar un proyecto de instalación de sistemas BESS dentro del país.

## 4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. H. VALENZUELA, EVALUACIÓN ECONÓMICA DE UN SISTEMA DE BATERÍAS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE CARGOS POR POTENCIA EN EL MERCADO CHILENO, Santiago de Chile: Universidad de Chile, 2017.
- [2] I. S. R. SACANCELA, DESPACHO ECONÓMICO DINÁMICO CONSIDERANDO LA INCORPORACIÓN DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA (SAE) EN EL SISTEMA ELÉCTRICO PARA EL USO EFICIENTE DE ENERGÍA RENOVABLE, Quito: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, 2021.
- [3] H. J. A. C. E. A. C. A. O. W. Q. R. Luis Arturo Estrada Torres, Diagnóstico, Análisis y Evaluación de los Sistemas de Almacenamiento de Energía con Baterías para su aplicación en la regulación primaria de frecuencia en una Central de Ciclo Combinado del Sistema Eléctrico Peruano, Lima: esan BUSINESS , 2019.
- [4] E. P. Sapena, Análisis económico de almacenamiento de energía en la red eléctrica mediante baterías de litio, Sevilla: Universidad de Sevilla, 2019.
- [5] D. E. P. PINO, APLICACIONES TÉCNICAS Y ECONÓMICAS DE SISTEMAS BESS EN PARQUES EÓLICOS Y FOTOVOLTAICOS EN EL SISTEMA ELÉCTRICO CHILENO, Santiago de Chile: Universidad de Chile, 2018.
- [6] *Constitución de la República del Ecuador*, 2008.
- [7] H. M. R. F. M. S. H. S. N. M. a. N. N. Eklas Hossain, *A Comprehensive Review on Energy Storage Systems: Types, Comparison, Current Scenario, Applications, Barriers, and Potential Solutions, Policies, and Future Prospects*, Oregon: MDPI, 2020.
- [8] A. I. J. P. H. Ibrahima, *Energy storage systems—Characteristics and comparisons*, Quebec: ELSEVIER, 2007.
- [9] G. Martín, *Sistemas de Almacenamiento de Energía*, Valladolid: ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES, 2016.
- [10] J. Martinez, «Sistema de Almacenamiento Mediante Baterías Electroquímicas,» 6 Junio 2019. [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Figura-4-Funcionamiento-bateria-Plomo-Acido-Fuente-Soler-2009\\_fig1\\_333641870](https://www.researchgate.net/figure/Figura-4-Funcionamiento-bateria-Plomo-Acido-Fuente-Soler-2009_fig1_333641870). [Último acceso: 27 Julio 2022].
- [11] A. D. Bank, *Handbook on Battery Energy Storage System*, Mandaluyong: Asian Development Bank, 2020.
- [12] A. Paz, *Dimensionamiento óptimo y análisis técnico económico de un Sistema de Almacenamiento de Energía*, Valparaíso: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2018.
- [13] Lazard, *LAZARD'S LEVELIZED COST OF STORAGE ANALYSIS — VERSION 3.0*, Nueva Orleans: Lazard, 2017.

- [14] Lazard, LAZARD'S LEVELIZED COST OF STORAGE ANALYSIS—VERSION 7.0, Nueva Orleans: Lazard, 2021.
- [15] G. P. David Fuchs, SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO CON ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN CHILE, Santiago de Chile: Deutsche Gesellschaft für Internationale, 2020.
- [16] T. T. Georgios Karmiris, PEAK SHAVING CONTROL METHOD FOR ENERGY STORAGE, Västerås: ABB AB, Corporate Research Center, 2014.
- [17] CONELEC, REGULACION CONELEC - 006-00 PROCEDIMIENTOS DE DESPACHOS Y OPERACIÓN, QUITO: CONELEC, 2004.
- [18] C. Burgos, *La importancia de un mercado de servicios complementarios en un sistema con alta inserción de energía renovable*, 2020.
- [19] CENACE, DETERMINACIÓN DE LA RESERVA RODANTE DE GENERACIÓN PARA EL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO PERIODO ABRIL 2022 - SEPTIEMBRE 2022, Quito: CENACE, 2022.
- [20] CENACE, Información General del Mercado Eléctrico Ecuatoriano 2017, Quito: CENACE, 2017.
- [21] G. CENACE, Datos aportados por la Gerencia Nacional de Planeamiento Operativo, QUITO: GPL CENACE, 2021.
- [22] B. R. T. S. D. Maisello, Business Models for Deploying and Operating Energy Storage and Risk Mitigation Aspects, IEEE, 201.
- [23] S. Morris, MODELOS DE NEGOCIO PARA SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO ANTE UN ESCENARIO DE ALTA PENETRACIÓN ERNC, Santiago de Chile: UNIVERSIDAD DE CHILE, 2017.
- [24] J. Mejía, Evaluación de esquemas de remuneración de Sistemas de Almacenamiento de Energía con Baterías a gran escala conectados a redes de transmisión en Colombia, Medellín: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, 2021.
- [25] L. Carvajal, Metodología de la Investigación Científica. Curso general y aplicado, 28 ed., Santiago de Cali: U.S.C., 2006, p. 139.