



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Implantación de un sistema de baterías para dar
soporte a una planta fotovoltaica

Autor: Nicolás Fernández Villoria

Director: Julio Rafael Portillo García

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Implantación de un sistema de baterías para dar soporte a una planta
fotovoltaica en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en
el
curso académico 2020/2021 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio
de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Nicolás Fernández Villoria

Fecha: 25/ 08/ 2021



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Julio Rafael Portillo García

Fecha: 26/ 08/ 2021

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. Nicolás Fernández Villoria

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: *Implantación de un sistema de baterías para dar soporte a una planta fotovoltaica*, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducir la en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.
- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción

de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 25 de Agosto de 2021

ACEPTA



Fdo.....

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Implantación de un sistema de baterías para dar
soporte a una planta fotovoltaica

Autor: Nicolás Fernández Villoria

Director: Julio Rafael Portillo García

Madrid

IMPLANTACIÓN DE UN SISTEMA DE BATERÍAS PARA DAR SOPORTE A UNA PLANTA FOTOVOLTAICA

Autor: Fernández Villoria, Nicolás.

Director: Portillo García, Julio Rafael.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Diseño de un sistema de almacenamiento de energía en baterías (BESS) asociada a una planta fotovoltaica de 240 MW en la costa oeste de EEUU. Se estudiará la problemática del impacto de la generación renovable en la estabilidad de frecuencia de la red y su minimización mediante el uso de BESS. Se definirá, además de la interconexión de potencia, la integración del sistema de control de las baterías con el controlador de planta y el SCADA para su funcionamiento coordinado.

Palabras clave: Generación, almacenamiento, fotovoltaica, BESS, renovable.

1. Introducción

La transición energética en la que se encuentra sumida el mundo entero no deja de avanzar, ya sea por las increíbles mejoras en muchas de las tecnologías ya existentes o por el descubrimiento de nuevas tecnologías de gran viabilidad, las cuales se espera que entren al mercado de forma competitiva a corto plazo. El punto en común de dichos avances es que ambos están alineados con el proceso de descarbonización y sostenibilidad que el mundo requiere hoy en día. Una de las tecnologías que está teniendo más impacto en dicho proceso es la fotovoltaica. En algunos casos, el desarrollo de esta tecnología está siendo desproporcionado y, en consecuencia, está provocando diversas ineficiencias en el sistema eléctrico en cuestión. Concretamente, la costa oeste de EEUU tiene un alto nivel de penetración de energía fotovoltaica que no ha dejado de crecer durante los últimos años, y que está ocasionando ciertos desbalances en el sistema. El principal problema al que se enfrentan dichos sistemas eléctricos es a la alta variabilidad incontrolada de generación que ocasiona la energía fotovoltaica. Una de las soluciones para mitigar es incertidumbre de generación consiste en la instalación de baterías junto a las instalaciones fotovoltaicas, en este caso se estudiará la implantación de un sistema de baterías en una instalación fotovoltaica en Nevada, con el fin de observar su impacto sobre la variabilidad de generación fotovoltaica. A su vez se realizará un estudio sobre el impacto de que ocasiona esta alta penetración renovable en la estabilidad de frecuencia y como dicho impacto se ve afectado con la instalación de baterías (BESS).

2. Definición del proyecto

Como se ha mencionado anteriormente la alta penetración de energía solar en la costa oeste está provocando que el sistema eléctrico opere lejos de su punto óptimo de funcionamiento, dichos desajustes están ocasionando variaciones en los precios, que impiden maximizar la creación de valor para el sistema. Lo mismo ocurre con el funcionamiento de la red, que al tenerse que adaptar a grandes cambios en la generación en breves intervalos de tiempo, termina operando en un estado significativamente lejano al óptimo.

En caso del sistema eléctrico de California (CASIO), una de las principales soluciones que se está planteando y que se considera altamente efectiva es la de aumentar considerablemente la capacidad de almacenamiento de energía del sistema mediante baterías (BESS), para ello, el regulador del sistema ha tomado medidas para incentivar el desarrollo de estas tecnologías, incluso, para los tres generadores mayoritarios del sistema se les ha impuesto una cantidad mínima de almacenamiento.

En el caso a estudiar, al igual que en el estado de California, la solución planteada consiste en implementar un sistema de baterías (BESS) que reduzca la inyección de energía a la red durante las franjas horarias con más penetración solar, para después inyectarla cuando la luz solar es más débil, aliviando así a los generadores con flexibilidad a la hora de incrementar su generación en un pequeño intervalo de tiempo.

3. Metodología

El desarrollo del proyecto se pretende estructurar en tres partes primordiales, cada una de ellas será consecutiva y dependiente de la anterior, de tal forma que la elaboración del proyecto tendrá de seguir un cierto orden cronológico.

La primera fase de elaboración consistirá en un profundo análisis y estudio del funcionamiento de los sistemas eléctricos de California y Nevada, con el funcionamiento se refiere al comportamiento de dichos sistemas durante su producción de energía diaria, para ello se analizará su mix energético, prestando especial atención al papel de la energía fotovoltaica en el mismo. Esta primera fase de desarrollo también incluye el exhaustivo estudio de la planta de generación fotovoltaica de 240MW donde se pretende instalar el sistema de baterías (BESS), donde se analizará primordialmente la estabilidad de frecuencia de la planta en escenarios de alta penetración renovable.

La segunda parte constará de un análisis preliminar de viabilidad de la instalación del sistema de almacenamiento, además de todo el proceso posterior de implementación del sistema en la instalación. En dicho proceso se asegurará el correcto funcionamiento del sistema de control de la planta, siguiendo de cerca el proceso de interconexión de las baterías con la planta, el proceso de compatibilidad entre los sistemas de control de la planta y de las baterías, además de su implementación en un sistema SCADA.

Por último, se realizará un análisis para evaluar el impacto de las implementaciones llevadas a cabo. Dicho estudio evaluará los efectos causados por el sistema de baterías en la instalación fotovoltaica, prestando especial atención a la variación de inyección de potencia a la red, los cambios experimentados en estabilidad de las variables de frecuencia y tensión del sistema. Por otro lado, se evaluará de forma hipotética el impacto de las baterías sobre el sistema eléctrico de la región, extrapolar los datos obtenidos de la planta fotovoltaica de 240MW.

4. Objetivos

- Analizar el impacto que tendría la instalación de sistemas de almacenamiento junto a complejos fotovoltaicos sobre la energía demandada en horas de limitada generación solar, a pesar de que el estudio se realizará sobre una instalación fotovoltaica de 240 MW, se espera dar con un resultado extrapolable.
- Analizar el impacto que conllevaría la instalación de un sistema de baterías en un complejo fotovoltaico sobre las variables indicadoras de la estabilidad de la red. Debido a las grandes variaciones de potencia intercambiada con la red, la estabilidad

del nodo en cuestión puede verse amenazada, se espera que con la implantación de las baterías dicha amenaza disminuya, para monitorizar el comportamiento del sistema se analizarán las variables de frecuencia y tensión.

- Se definirá y comprobará la correcta interconexión de potencia entre los módulos de generación fotovoltaicos y el sistema de baterías (BESS), además de la correcta conexión entre el controlador de la planta de generación y el sistema de control de baterías. Además, se asegurará la completa coordinación entre todos los sistemas de control de la instalación fotovoltaica mediante un sistema SCADA.
- Promover el desarrollo y la viabilidad del proyecto desde una perspectiva de sostenibilidad, analizando el impacto medioambiental de la instalación de almacenamiento. También se estudiará la contribución de la instalación al proceso de descarbonización del sistema eléctrico debido al incremento de energía verde que se espera que la planta aporte al sistema.

IMPLEMENTATION OF A BATTERY SYSTEM TO SUPPORT A PHOTOVOLTAIC PLANT

Author: Fernández Villoria, Nicolás.

Supervisor: Portillo García, Julio Rafael.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

Design of a battery energy storage system (BESS) associated with a 240 MW photovoltaic plant on the west coast of the USA. The impact of renewable generation on the frequency stability of the grid and its minimization through the use of BESS will be studied. In addition to the power interconnection, the integration of the battery control system with the plant controller and SCADA for its coordinated operation will be defined.

Keywords: Generation, storage, photovoltaic, BESS, renewable.

1. Introduction

The energy transition in which the whole world is immersed continues to advance, either by the incredible improvements in many of the existing technologies or by the discovery of new technologies of great viability, which are expected to enter the market competitively in the short term. The common point of these advances is that both are aligned with the decarbonization and sustainability process that the world requires today. One of the technologies that is having the greatest impact on this process is photovoltaics. In some cases, the development of this technology is being disproportionate and, as a result, is causing various inefficiencies in the electricity system in question. Specifically, the West Coast of the USA has a high level of PV penetration that has been growing steadily over the last few years and is causing certain imbalances in the system. The main problem faced by these power systems is the high uncontrolled variability of generation caused by photovoltaic energy. One of the solutions to mitigate this generation uncertainty is the installation of batteries next to the photovoltaic installations. In this case, the implementation of a battery system in a photovoltaic installation in Nevada will be studied in order to observe its impact on the variability of photovoltaic generation. At the same time, a study will be carried out on the impact of this high renewable penetration on frequency stability and how this impact is affected by the installation of batteries (BESS).

2. Project definition

As mentioned above, the high penetration of solar energy on the west coast is causing the electric system to operate far from its optimal operating point, such mismatches are causing variations in prices, which prevent maximizing the creation of value for the system. The same happens with the operation of the network, which, having to adapt to large changes in generation in short intervals of time, ends up operating in a state significantly far from the optimum.

In the case of the California electric system (CASIO), one of the main solutions being proposed and which is considered highly effective is to considerably increase the system's energy storage capacity through batteries (BESS), for which the system

regulator has taken measures to encourage the development of these technologies, including imposing a minimum amount of storage for the system's three main generators.

In the case under study, as in the state of California, the solution proposed is to implement a battery system (BESS) that reduces the injection of energy into the grid during the time slots with more solar penetration, and then inject it when sunlight is weaker, thus relieving the generators with flexibility to increase their generation in a small time interval.

3. Methodology

The development of the project is intended to be structured in three main parts, each one of them will be consecutive and dependent on the previous one, in such a way that the elaboration of the project will have to follow a certain chronological order.

The first phase of development will consist of an in-depth analysis and study of the operation of the electricity systems of California and Nevada, with the operation referring to the behavior of these systems during their daily energy production, for which purpose their energy mix will be analyzed, paying special attention to the role of photovoltaic energy in the same. This first phase of development also includes the exhaustive study of the 240MW photovoltaic generation plant where the battery system (BESS) is intended to be installed, where the frequency stability of the plant will be analyzed primarily in scenarios of high renewable penetration.

The second part will consist of a preliminary feasibility analysis of the installation of the storage system, in addition to the subsequent process of implementation of the system in the facility. This process will ensure the correct operation of the control system of the plant, closely following the interconnection process of the batteries with the plant, the compatibility process between the control systems of the plant and the batteries, in addition to its implementation in a SCADA system.

Finally, an analysis will be carried out to evaluate the impact of the implementations carried out. This study will evaluate the effects caused by the battery system on the photovoltaic installation, paying special attention to the variation of power injection to the grid, the changes experienced in the stability of the frequency and voltage variables of the system. On the other hand, the impact of the batteries on the electrical system of the region will be evaluated in a hypothetical way, extrapolating the data obtained from the 240MW photovoltaic plant.

4. Objectives

- To analyze the impact that the installation of storage systems together with photovoltaic complexes would have on the energy demanded in hours of limited solar generation, although the study will be carried out on a 240 MW photovoltaic installation, it is expected to give an extrapolable result.
- To analyze the impact that the installation of a battery system in a photovoltaic complex would have on the variables indicating the stability of the grid. Due to the large variations of power exchanged with the grid, the stability of the node in question may be threatened, it is expected that with the implementation of the

batteries this threat will decrease, to monitor the behavior of the system the variables of frequency and voltage will be analyzed.

- The correct power interconnection between the photovoltaic generation modules and the battery system (BESS) will be defined and checked, as well as the correct connection between the generation plant controller and the battery control system. In addition, complete coordination between all the control systems of the photovoltaic installation will be ensured by means of a SCADA system.
- Promote the development and feasibility of the project from a sustainability perspective, analyzing the environmental impact of the storage facility. The contribution of the installation to the decarbonization process of the electrical system will also be studied due to the increase of green energy that the plant is expected to contribute to the system.

ÍNDICE

Chapter 1. Introducción	5
Chapter 2. Generación Renovable	8
2.1 Introducción.....	8
Chapter 3. Estado de la Cuestión	20
3.1 Mix de generación en Nevada	20
3.2 Requerimientos del Operador del Sistema	30
3.3 Estudio de caso similar (CAISO)	37
Chapter 4. Almacenamiento de energía en baterías (BESS)	46
4.1 Estado del arte	46
4.2 Tecnología de baterías.....	49
4.3 Aplicaciones	59
Chapter 5. Descripción del proyecto	64
5.1 Planta Solar	64
5.2 BESS	69
5.3 Integración de bess en la central.....	72
Chapter 6. Impacto en el sistema	78
6.1 Participación en control de frecuencia	78
6.2 Otros efectos.....	81
Chapter 7. Análisis de Viabilidad Económica	86
7.1 Impacto LCOE	86
7.2 Otros incentivos.....	90
Chapter 8. Referencias	95

Lista de Figuras

Figura 2-1: Objetivos de desarrollo sostenible.....	10
Figura 2-2: Evolución del mix energético[5]	14
Figura 2-3: Evolución en el uso de energías primarias[5].....	14
Figura 2-4: Evolución de capacidad solar instalada[5]	15
Figura 3-1: Mix Energético Nevada 2019[9]	27
Figura 3-2: Capacidad/Generación renovable Nevada 2019[9]	27
Figura 3-3: Consumo energético Nevada 2019[9]	28
Figura 3-4: Evolución del mix energético Nevada[9][10][11][12][13]	29
Figura 3-5: Evolución del consumo energético Nevada[9][10][11][12][13]	30
Figura 3-6: Mix energético CAISO 2020[16]	39
Figura 3-7: Mix energético de renovables CAISO 2020[16]	41
Figura 3-8: Evolución en la generación energética de renovables y tecnologías convencionales[16].....	42
Figura 3-9: Evolución de la generación energética por tecnologías[16].....	43
Figura 3-10: Mix energético diario[17]	44
Figura 3-11: Mix energético diario de renovables[18].....	45
Figura 3-12: Perfil energético diario de baterías[19].....	45
Figura 4-1: Evolución en el despliegue de baterías[20]	47
Figura 4-2: Esquema de conexión BESS conjunto.....	51
Figura 4-3: Esquema de conexión BESS separados.....	51
Figura 4-4: Hoja de características BYD Company[22]	53
Figura 4-5: Hoja de características Kokam[23].....	55
Figura 4-6: Hoja de características LG Chem[24].....	56
Figura 4-7: Hoja de características NGK Insulators[25]	57
Figura 4-8: Hoja de características Samsung SDI Co[26].....	58
Figura 4-9: Hoja de características Hyosung[27]	58
Figura 4-10: Proceso estabilización de renovables[27].....	60
Figura 4-11: Funcionamiento servicios auxiliares[25].....	61

Figura 4-12: Proceso de descongestión de red mediante baterías[25].....	62
Figura 5-1: Especificaciones de trafo subestación	65
Figura 5-2: Imagen satelital de subestación	65
Figura 5-3: Especificaciones de conductores de línea de transporte.....	66
Figura 5-4: Imagen satelital de línea de transporte.....	67
Figura 5-5: Plano del centro de control	68
Figura 5-6: Unifilar planta solar + sistema de almacenamiento.....	69
Figura 5-7: Esquema contenedor Hyosung[27].....	71
Figura 5-8: Esquema de la integración BESS en el sistema.....	73
Figura 5-9: Configuración AC-Coupling	74
Figura 5-10: Configuración DC-Coupling/BESS.....	74
Figura 5-11: Configuración DC-Coupling/PV	75
Figura 5-12: Suministro de potencia en función de la configuración.....	75
Figura 7-1: Términos fórmula LCOSS[37].	87
Figura 7-2: Comparación de valores de mercado y valores de planta.....	90

Lista de Tablas

Tabla 1: Datos LCOE	86
Tabla 2: Datos LCOSS	89
Tabla 3: Cálculo de términos LCOSS	89
Tabla 4: Remuneración $P < P_{min}$	93
Tabla 5: Extra remuneración $P < P_{min}$	93
Tabla 6: Remuneración $P > P_{min}$	94
Tabla 7: Extra remuneración $P > P_{min}$	94

Chapter 1. INTRODUCCIÓN

La transición energética en la que se encuentran involucrados todos los sectores económicos del mundo no deja de avanzar, como no podía ser de otra forma, el sector eléctrico está siendo el gran precursor de este movimiento, viéndose este mismo impulsado por las increíbles mejoras en muchas de las tecnologías ya existentes o por el descubrimiento de nuevas tecnologías de gran viabilidad, las cuales se espera que entren al mercado de forma competitiva a corto plazo. El punto en común de dichos avances es que ambos están alineados con el proceso de descarbonización y sostenibilidad que el mundo requiere hoy en día. Una de las tecnologías que está teniendo más impacto en dicho proceso es la energía fotovoltaica.

En algunos casos, el desarrollo de esta tecnología en regiones concretas está siendo desproporcionado y, en consecuencia, está provocando diversas ineficiencias en el sistema eléctrico en cuestión. Concretamente, la costa oeste de EEUU tiene un alto nivel de penetración de energía fotovoltaica [1] que no ha dejado de crecer durante los últimos años, y que está ocasionando ciertos desbalances en el sistema. El principal problema al que se enfrentan dichos sistemas eléctricos es a la alta variabilidad incontrolada de generación que ocasiona la energía fotovoltaica. Los aspectos más susceptibles de cambio dentro del sistema eléctrico, que pueden impulsar una correcta integración de las energías renovables se identifican como, implantación de tecnologías facilitadoras, adaptación de tanto modelos de negocio como diseños de mercado, y aumento en la eficacia de los operadores del sistema.

A pesar de que se pretende comentar y analizar todos los aspectos anteriormente mencionados, la presente tesis tiene como objetivo principal, centrarse en el papel que va a jugar la energía fotovoltaica en este transitorio necesario hacia una economía descarbonizada. Las soluciones más utilizadas para mitigar el efecto que tiene la alta variabilidad de generación renovable sobre los sistemas eléctricos pasan por, implantar bancos de baterías, promover el servicio de flexibilidad de consumo en las instalaciones de demanda, impulsar la conversión de energía a calor/hidrógeno en los periodos de sobre

generación y uso de redes inteligentes. Todas las opciones anteriormente descritas son perfectamente válidas para llevar a cabo la integración de energías renovables, sin embargo, la más accesible desde el punto de vista de un generador es la de implantación de un banco de baterías, y dado que el presente proyecto pretende evaluar la situación desde dicha perspectiva (se explica a continuación el porqué), es la solución a la integración de energía fotovoltaica que se pretende estudiar con más detenimiento.

La investigación sobre la energía fotovoltaica y la implementación de un sistema de baterías pretende ser aplicada a una instalación de generación en el estado de Nevada (USA), con el fin de proponer soluciones o estrategias que maximicen la explotación del sistema. En primer lugar, se pretende analizar el efecto económico que dicho proyecto puede suponer para el sistema, dado que realizar un análisis cuantitativo del efecto sobre el sistema en su totalidad se considera una tarea de gran complejidad, el análisis se realizará únicamente sobre los efectos en la instalación de generación en cuestión, con la intención de extrapolar los resultados. En segundo lugar, se pretende cuantificar y analizar el efecto que el proyecto tendría sobre los requerimientos técnicos de red que actualmente el sistema está tratando de obtener, pero que, debido a la alta penetración de fotovoltaica, no están siendo tan sencillos de obtener.

Como se ha mencionado anteriormente la alta penetración de energía solar en la costa oeste está provocando que el sistema eléctrico opere lejos de su punto óptimo de funcionamiento, dichos desajustes están ocasionando distorsiones en los precios, que impiden maximizar la creación de valor para el sistema. Lo mismo ocurre con el funcionamiento de la red, que al tenerse que adaptar a grandes cambios en la generación en breves intervalos de tiempo, termina operando en un estado significativamente lejano al óptimo, incurriendo en numerosas pérdidas.

En caso del sistema eléctrico de California (CASIO), una de las principales soluciones que se está planteando y que se considera altamente efectiva es la de aumentar considerablemente la capacidad de almacenamiento de energía del sistema mediante baterías (BESS), para ello, el regulador[2] del sistema ha tomado medidas para incentivar el desarrollo de estas

tecnologías, incluso, ha llegado a imponer capacidades mínimas de almacenamiento a algunos de los agentes del sistema con más relevancia.

En el caso a estudiar, al igual que propone el operador del sistema en el estado de California, la solución planteada consiste en implementar un sistema de baterías (BESS) que reduzca la inyección de energía a la red durante las franjas horarias con más penetración solar, para después inyectarla cuando la luz solar es más débil, aliviando así a los generadores con flexibilidad a la hora de incrementar su generación en un pequeño intervalo de tiempo y manteniendo las características de seguridad, fiabilidad y calidad a la hora de proveer a los consumidores con energía eléctrica.

Como ya se ha comentado en los apartados anteriores de este proyecto, la alta penetración de energía solar está afectando negativamente a el funcionamiento de los sistemas eléctricos, ya sea a nivel global, es decir, disminuyendo el beneficio social de tanto consumidores como generadores, o ya sea a agentes concretos que se ven obligados a operar fuera de su rango óptimo de generación, con el fin de adaptarse a lo demandado por red. Se quiere recalcar que el problema que pretende abordar el presente proyecto, no solo se limita a los sistemas eléctricos de Nevada o CAISO, sino que, debido al gran incremento de penetración renovable esperado en todo el mundo, se espera que las mismas deficiencias que están sopesando los citados sistemas se trasladen a regiones en todo el mundo. La posibilidad de encontrar una solución viable en todos sentidos, que genere valor para todos los agentes del sector energético es la motivación principal de este proyecto.

Chapter 2. GENERACIÓN RENOVABLE

2.1 INTRODUCCIÓN

Exponer los objetivos que se plantean para las próximas décadas. (COP 21, París Agreement, road map de alguna empresa del sector)

El mundo se encuentra en una transición sin precedentes hacia un futuro definido una sostenibilidad tanto económica como medioambiental; que permita el desarrollo de un sistema económico bajo en emisiones de CO₂ y comprometido con el ecosistema a todos los niveles, inclusividad; que de la oportunidad de tanto participar como aprovecharse a todos los individuos independientemente de sus condiciones personales, protección; que se sirva de mecanismos regulatorios para asegurar su correcto desarrollo sin perjudicar a todos los agentes participantes en el proceso. Dichos objetivos y muchos más, han sido establecidos y dictaminados por importantes organizaciones y acuerdos a nivel mundial, los dos ejemplos con más peso y reconocimiento son, por un lado, los objetivos de desarrollo sostenible establecidos por las Naciones Unidas, y el Acuerdo de París, donde 196 países se comprometieron a reducir las emisiones de CO₂ sistemáticamente con el objetivo de mantener el calentamiento global por debajo de los 2°C.

Los objetivos de desarrollo sostenible (ODS)[4] tienen la función de actuar como directrices, ya no solo para los países miembros, sino también para cualquier institución u organización que tenga la capacidad de adaptarse y apoyar dichos objetivos. Los objetivos de desarrollo sostenible se enumeran a continuación, describiendo en más profundidad aquellos que están relacionados con algún aspecto del proyecto.

- 1. Fin de la pobreza:** A pesar de que los índices de pobreza hayan disminuido considerablemente en las últimas décadas, la velocidad de decrecimiento está siendo cada vez menor, lo cual es un dato alarmante teniendo en cuenta que todavía hay aproximadamente un 10% de la población mundial bajo el umbral de pobreza.

2. **Hambre cero**
3. **Salud y bienestar:** A pesar de los grandes avances médicos que ha experimentado nuestra sociedad, el COVID-19 nos ha demostrado que garantizar la salud y el bienestar en el mundo es una tarea de largo recorrido y que requiere una constante evolución y adaptación al entorno.
4. **Educación de calidad**
5. **Igualdad de género**
6. **Agua limpia y saneamiento**
7. **Energía asequible y no contaminante:** Actualmente podemos presumir de que el mundo se encuentra en un avance continuo en lo que a este séptimo objetivo respecta, los principales factores que determinan este avance son, el aumento de energías renovables, el aumento de la eficiencia energética y la reducción de emisiones. A pesar de todo, quedan grandes retos por completar, como la electrificación de gran parte de África y la extensión de la sostenibilidad energética más allá del sector eléctrico.
8. **Trabajo decente y crecimiento económico**
9. **Agua, industria, innovación e infraestructura:** Este sector es un indicador muy significativo de la evolución económica de un país o sociedad, a pesar de que en los países desarrollados sea un sector puntero y este considerablemente avanzado, en los países más subdesarrollados se considera una herramienta vital para estimular la economía y el avance tecnológico, siendo la eficiencia energética y de recursos unos de los puntos de mayor importancia.
10. **Reducción de las desigualdades**
11. **Ciudades y comunidades sostenibles:** El número de habitantes en núcleos urbanos no ha dejado de crecer durante los últimos años, y no se prevé que vaya a dejar de hacerlo durante las próximas décadas. Este crecimiento tan repentino ha provocado algunos fallos de adaptación en las grandes urbes, dejando a muchos habitantes en situaciones de vulnerabilidad y provocando sobrecargas en servicios ciudadanos como la recogida de residuos o saturación de carreteras, que al final acaban deteriorando las condiciones de habitabilidad de las ciudades.

- 12. Producción y consumos responsables:** Tanto la explotación de recursos como la consumición de los mismos son fases naturales de la economía capitalista sobre la que nos sustentamos, y por lo tanto son necesarias. Sin embargo, el camino seguido durante el último siglo ha superpuesto la prosperidad económica al medioambiente, lo cual ha provocado un deterioro sin precedentes en el mismo. No ha sido hasta que la sociedad se ha dado cuenta de que tanto la prosperidad económica como la propia supervivencia del ser humano van ligadas al cuidado del medio ambiente.
- 13. Acción por el clima:** Tanto el efecto invernadero como el cambio climático son fenómenos que afectan a todos los países del mundo, y que están provocando efectos catastróficos sobre el ecosistema terrestre, subida de los niveles del mar, fenómenos meteorológicos más extremos e impredecibles y subida de la temperatura global, sin ir más lejos, esta última década ha sido la más calurosa jamás registrada.
- 14. Vida submarina**
- 15. Vida de los ecosistemas**
- 16. Paz, justicia e instituciones sólidas**
- 17. Alianzas para lograr objetivos**



Figura 2-1: Objetivos de desarrollo sostenible.

El Acuerdo de París[3] es uno de los tratados más emblemáticos de los últimos años, ya no solo por el hecho de que tuviese como objetivo principal tan vital como el de limitar el aumento de temperatura a dos grados centígrados con respecto a la era preindustrial sino por el histórico número de países que firmaron el tratado, 195 en total. Los principales puntos del Acuerdo de París se describen a continuación.

- **Objetivo:** Mantener el aumento anual de la temperatura global por debajo de los 2 grados centígrados respecto a la era preindustrial, intentando alcanzar un aumento de 1,5 grados centígrados anuales.
- **Reducción de emisiones:** El tratado estipula que es necesario alcanzar el pico máximo de emisiones de carbono para comenzar la etapa de reducción de emisiones.
- **Compromiso de los países:** 195 países firmaron el acuerdo, comprometiéndose así con las restricciones establecidas sobre las emisiones. Dichas restricciones entran en vigor en 2020 y serán revisables cada 5 años, con el fin de reevaluar las condiciones hacia una perspectiva más ambiciosa.
- **Transparencia:** Se pretende que la actuación de todos los países miembros sea llevada a cabo dentro de un marco de transparencia, dicho marco incluye sobre todo información relativa a las emisiones y a las inversiones llevadas a cabo.
- **Mecanismo de mercado:** Los países miembros podrán utilizar mercados para enviar señales de inversión a los agentes involucrados en el sector, promoviendo así actividades que reduzcan las emisiones de carbono.
- **Compromiso financiero:** Los países con mayor músculo financiero, que generalmente suelen ser los países desarrollados, han de dotar con inversiones a aquellos países con menos capacidades económicas, que por lo general suelen ser los países más subdesarrollados.
- **Daños irreversibles:** Este punto tiene el objetivo de que los países miembros reconozcan que se pueden producir daños irreversibles en el sistema, y que por lo tanto pueden dañar nuestro planeta de forma permanente. Si es cierto, que dicho reconocimiento no va ligado a indemnizaciones, todavía.

- Forma legal y cumplimiento: El Acuerdo de París es legalmente vinculante, si bien es cierto, que los objetivos nacionales contra el cambio climático los establece cada país, siendo los puntos establecidos en el Acuerdo de París meras directrices.
- Entrada en vigor: El Acuerdo de París entró en vigor el 4 de noviembre de 2016, 30 días después de ser ratificado por 55 partes.

Como se ha comentado anteriormente, el mundo se encuentra envuelto en un proceso hacia la sostenibilidad, marcado actualmente por un proceso de descarbonización a todos los niveles económicos. Estados Unidos, como una de las principales potencias mundiales, tiene previsto liderar esta transición hacia una economía sostenible, así se especifica en el informe de IRENA[5] para 2030.

Dada la cultura de innovación y emprendedora, sumada al músculo financiero que siempre ha caracterizado a US, no es alarmante prever que vaya a ser uno de los países con mayor influencia en la transición energética, sin importar el sector, y es que se prevé que dicha transición no vaya a afectar únicamente al sector eléctrico, sino que también otros sectores como la industria, el transporte o los edificios van a experimentar un cambio sustancial en la procedencia de la energía primaria que consumen.

La cuota de renovables en US en 2010 rondaba el 7,5% del total, compuesta de un 2,5% de energía renovable, un 1,6% de biocombustibles líquidos y un 3,4% de biomasa sólida, siendo bastante llamativo que el nivel de biomasa supera al de renovables, esto se debe a que se utilizan grandes volúmenes de biomasa en procesos de fabricación a nivel industrial y en edificios. Utilizando el caso anterior como escenario base, se prevé un aumento de la producción de renovables en un 10%, mientras que en otros escenarios más optimistas se estima que sería económica y técnicamente factible conseguir un aumento de renovables de hasta un 27% de la energía primaria consumida. Dicho valor se considera un objetivo muy valioso y positivo, acorde además, con las cuotas de renovables que exige la Unión Europea para 2030. En caso de que se consiguiese un 27% de consumición energética renovable, se estiman unos ahorros anuales de 38 billones de dólares americanos, y si se tuviesen en cuenta los ahorros provenientes de reducciones en gastos de salud y emisiones de CO₂, se llegarían

a los 140 billones anuales. Por otro lado, para alcanzar el porcentaje de renovables deseado, se deberán realizar sustanciales inversiones en capacidad energética, de alrededor de 38 billones anuales más de lo que se invertiría en el escenario base, ascendiendo el valor total de inversión a 86 billones de dólares anuales. En caso de que se alcanzase ese 27% de renovables, las emisiones de CO₂ caerían un 30% más comparado con las emisiones previstas en el caso base (10% de incremento renovable) y un 33% comparadas con 2005. Para cumplir el objetivo del 27% la cuota de producción eléctrica renovable ha de ascender de un actual 14% a un 50%, como se puede presuponer, dicho incremento estará marcado principalmente por la puesta en funcionamiento de nuevas plantas de generación renovable. Para llevar a cabo una implementación de este tipo es necesario, no solo la realización de nuevas inversiones en las propias plantas de generación, sino también en la adaptación de la red. Este último mencionado tipo de inversiones conlleva mejoras en la red de transporte, red de distribución y en aspectos tecnológicos que vinculan la red con la planta de generación. Otro sector energético del cual se prevé un gran impacto en el futuro es el de uso de energías renovables de forma directa mediante consumidores.

Este sector envuelve a tres grandes participantes como pueden ser la industria, el transporte o los edificios, los cuales, cada vez más, están incrementando el uso de tecnologías como la termo solar, bio combustibles o coches eléctricos, de los cuales se espera un gran impacto en la electrificación de la demanda.

Otro de los factores que va a determinar significativamente el avance hacia la descarbonización de US son las políticas y regulaciones aplicadas, dichas políticas han de proponer incentivos mediante el uso de mercados y ser estables para asegurar inversiones a largo plazo.

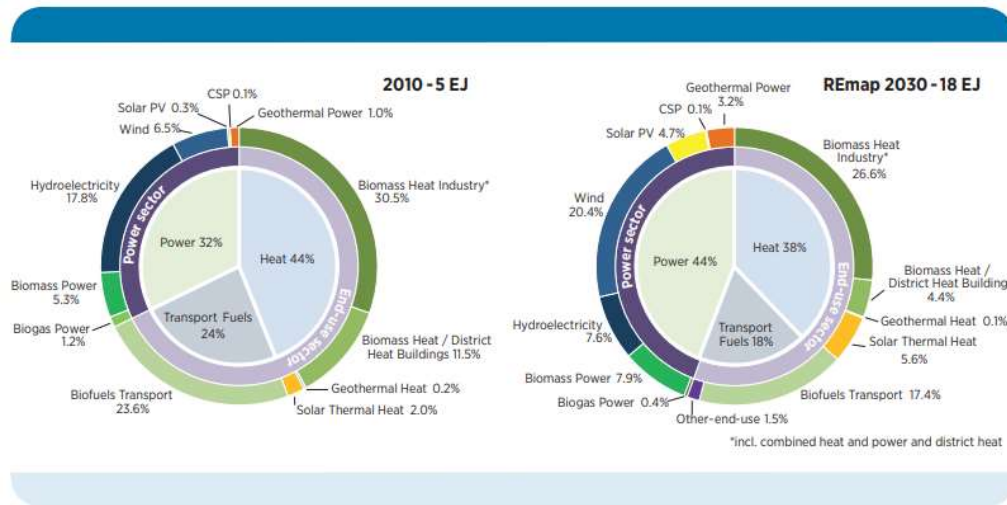


Figura 2-2: Evolución del mix energético[5]

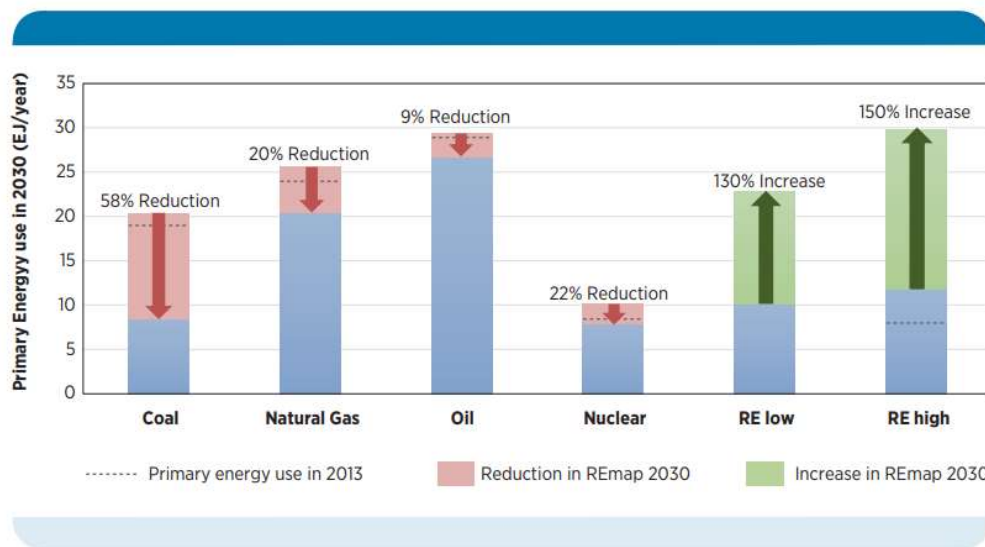


Figura 2-3: Evolución en el uso de energías primarias[5]

Concretando más sobre la energía solar, como es de esperar, al ser una fuente de producción energética libre de emisiones de CO₂ se prevé que vaya a tener gran influencia sobre el mix energético que se espera durante los próximos años, si a eso le añadimos la exponencial

reducción de costes que han experimentando las tecnologías de generación solar durante la última década (casi 10 veces menores), la tecnología solar se ha convertido una de las tecnologías más predominantes y prometedoras en el sistema energético. Conviene también discernir entre los dos tipos de tecnologías empleadas actualmente, por un lado, la energía solar térmica o “*Concentrating solar power (CSP)*”, que se basa, al igual que muchas centrales convencionales, en la transformación de vapor de agua en electricidad, por otro lado, la energía solar fotovoltaica (PV), a diferencia de la térmica, no usa el calor generado por el sol, sino que absorbe la luz solar mediante las placas fotovoltaicas para transformar directamente dicha energía en corriente continua. Como se puede observar en la siguiente gráfica, la cuota de producción solar se encuentra dominada totalmente por la solar fotovoltaica, siendo el porcentaje de energía generada por la solar térmica de aspecto residual.

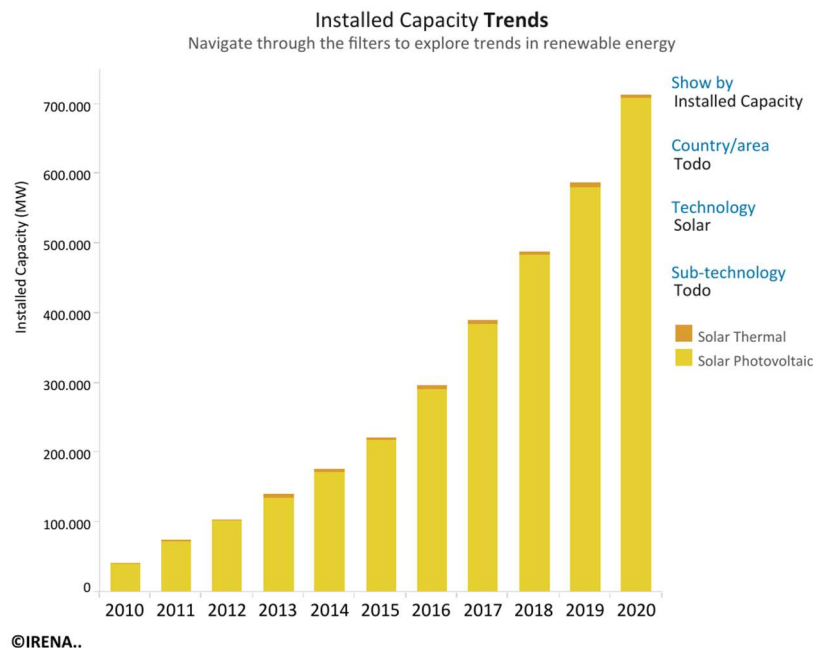


Figura 2-4: Evolución de capacidad solar instalada[5]

Como se puede ver en la gráfica, no solo la predominancia de la generación solar fotovoltaica sobre la solar térmica resulta ser un gran llamativo, sino también el incremento exponencial que ha sufrido la capacidad instalada a lo largo de los años, que como se comentaba antes,

ha supuesto que muchos sistemas eléctricos del mundo sean dependientes del sol unos niveles que pueden incluso a ser perjudiciales. Analizando ahora la distribución de la producción energética solar a nivel geográfico[6], el primer hecho a destacar es que China actualmente es el mayor productor de energía solar, a pesar de que sigue siendo el país más contaminante del mundo, seguido de Japón, USA y Alemania. En cuanto a los continentes con mayor predominancia solar destaca Europa, con 98,8 GW de potencia instalada, seguido muy de cerca por Asia con un 92,3 GW (2017), por otro lado, África se desmarca como el continente con menor potencia instalada del mundo, apenas un 1,92 GW instalados. Sin embargo, y a pesar de los bajos niveles de producción solar en África, gracias a sus altos niveles de irradiación solar se prevé que en el futuro vaya a ser un continente líder en cuanto a producción fotovoltaica, si bien es cierto que los niveles de electrificación que se han de alcanzar para conseguir dicho objetivo son muy ambiciosos.

En cuanto a los principales desafíos[7] que implican la instalación de nueva generación renovable esta la variabilidad de las fuentes primarias de producción, las dos fuentes de producción más influyentes en este aspecto son la luz solar y el viento. Dicha variabilidad requiere mecanismos de balance para asegurar un correcto funcionamiento del sistema, los mencionados mecanismos suelen estar basados principalmente en la implantación de tecnologías que aportan una mayor flexibilidad al sistema. En algunos casos coincidirá que los aerogeneradores producirán una mayor cantidad de energía según aumenta el nivel de demanda, en otros casos sin embargo, esto no será así, y por lo tanto el sistema ha de tener recursos de balance para acomodar el equilibrio entre generación y demanda. De forma similar sucede con las instalaciones de energía solar, que en ocasiones sus niveles de generación están por encima de los necesarios para satisfacer la demanda del sistema, en cuyo caso se ven forzadas a reducir sus niveles de generación a sus mínimos técnicos para mantener la fiabilidad del sistema. Mientras que la energía eólica tiene un perfil de producción difícilmente predecible hasta el corto plazo, la producción de energía solar es fácilmente predecible gracias al ciclo de la noche y el día. Sin embargo, el perfil de generación eólica tiene un carácter más constante a lo largo del tiempo, mientras que el perfil solar es muy marcado y variable a lo largo del día. El perfil que presenta la tecnología solar

es de gran interés para muchos sistemas eléctricos con significativa penetración solar, dado el impacto que esta tiene sobre el mix de producción energética a nivel horario. Durante el amanecer los niveles de generación solar aumentan de forma exponencial en cortos periodos de tiempo, lo mismo ocurre durante el atardecer, de una forma más marcada todavía. Este fenómeno implica que el sistema debe tener mecanismos de flexibilidad para hacer frente a las rampas de subida/bajada y conservar el balance entre generación y demanda.

Los problemas ocasionados por la integración de renovables anteriormente comentados tienen diversas soluciones[7] que mitigan los efectos de la incertidumbre de generación, las principales son, modelos de predicción, diferentes prácticas operacionales, almacenamiento, flexibilidad de la demanda, generación flexible y otros mecanismos. El uso de dichos mecanismos dependerá significativamente de la topología y características de la red en cuestión, ya que cada uno de ellos tiene formas de adaptación distintas.

- **Predicciones avanzadas:** Como se podrá presuponer, el uso de herramientas de predicción está muy extendido por numerosos sistemas eléctricos, ser capaces de predecir con cierta exactitud el nivel de producción de energías primarias como el sol o el viento aporta cuantiosos beneficios al sistema y facilita la función del operador del sistema a la hora de despachar a los agentes de generación. Destacar que este mecanismo es vital cuando se dan fenómenos extremos que sin dicha herramienta tendrían efectos muy negativos sobre el sistema. Además, estos mecanismos han experimentado una evolución considerable desde el inicio de su uso, mejorando su precisión y fiabilidad durante los últimos años, en 2009 la media de errores rondaba el 15%, mientras que actualmente el rango de error suele estar entre un 3% y un 6%.
- **Prácticas operacionales (Rápido despacho y mayor área de balance):** Una asignación de ofertas en tiempo real es un mecanismo que ayuda a mitigar el efecto de la variabilidad de generación renovable, ya que fija la generación con la demanda en tiempo real, lo cual acaba siendo más eficiente que establecer contratos a largo plazo con los generadores y luego tener que emplear mayor volumen de recursos provenientes de los sistemas de balance, que son más caros. A pesar de que el

comentado mecanismo se implantó con el fin de reducir costes operacionales del sistema, ha resultado ser una herramienta muy satisfactoria para armonizar la integración de las renovables.

- **Gestión de reservas:** La principal implicación de la gestión de reservas en la integración de las renovables consiste en la reducción de las mismas. Las reservas están diseñadas para hacer frente a eventos excepcionales que pueden afectar negativamente al sistema, y no para afrontar las variaciones en la generación ocasionadas por las renovables. En una primera instancia, este mecanismo se utilizó para mitigar la variabilidad de las renovables, pero es extremadamente caro y por lo tanto inviable si se utiliza para estos casos. Es por eso que el principal objetivo ha sido suprimir el uso de este mecanismo para armonizar la integración de las renovables, en consecuencia, se han propuesto incentivos para evitar que las reservas sean utilizadas de forma innecesaria, uno de ellos consiste en limitar las rampas a unidades de generación renovable, de tal forma que los requerimientos de flexibilidad sean menos exigentes y por lo tanto menos costosos.
- **Diseño de mercado (Mercados de flexibilidad):** Una de las características que definen a las energías renovables solar y eólica es que tienen unos costes variables prácticamente nulos, lo cuál afecta a otras tecnologías con costes variables mayores que participan en el mismo mercado. Este prácticamente nulo coste variable de las renovables genera que el precio del mercado marginal eléctrico sea menor y por lo tanto impide que otras tecnologías recuperen sus costes de inversión. Otra preocupación en relación a los mercados es que en algunos casos no se considera suficientemente incentivo el despacho en tiempo real (5 minutos de antelación en US) para realizar un balance equilibrado entre generación y demanda, en consecuencia, se están implementando otros mecanismos de incentivos para reducir las rampas abruptas de generación. Un claro ejemplo dicho tipo de mecanismo es el “flexi-ramp” implementado en el sistema CAISO, que tiene el objetivo de proveer al sistema con suficiente capacidad de rampa.
- **Flexibilidad de la demanda:** El servicio auxiliar de flexibilidad de la demanda tiene cierta antigüedad en ciertos sistemas eléctricos, sin embargo, se prevé que vaya a ser

un servicio de gran impacto en un futuro próximo. Dicho servicio consiste principalmente en la provisión de una capacidad de flexibilidad mediante la variación de carga de un agente concreto de la demanda. En un pasado el servicio consistía en una desconexión total y solo se usaba en ocasiones concretas debido a su alto coste, sin embargo, los nuevos servicios que se pretenden implementar envuelven la participación de la demanda en el mecanismo de balance en tiempo real, el cuál es de gran uso para mitigar las variaciones repentinas en la producción renovable.

- Agentes flexibles de generación: Otra forma común de aportar flexibilidad al sistema consiste en el uso de tecnologías de generación convencionales, que son capaces de generar energía a su antojo, sin depender de fuentes primarias que aporten variabilidad a sus niveles de generación. Dichos generadores suelen ser los principales responsables de cubrir la generación que deja descubierta la energía solar cuando anochece, en cuyos casos suelen alcanzar sus límites de rampa, de ahí que sean necesarios otros elementos de flexibilidad para cubrir la capacidad de rampa restante.

Chapter 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

3.1 MIX DE GENERACIÓN EN NEVADA

- **Aspectos Generales:**

El estado de Nevada, también conocido como el Estado de la Plata debido a que está situado en yacimientos con abundantes cantidades de oro y plata, en los que está basada principalmente la economía estatal, también tiene otro motor económico fundamental, las energías renovables[8]. Gracias al desierto de grandes magnitudes que se encuentra en la región, Nevada es considerado el estado con mayor potencial solar de toda la nación, unido a que el desarrollo de tecnologías solares está considerablemente avanzado, Nevada se ha convertido en un foco de interés para la instalación de energías solares. Otra gran tecnología de generación energética que se encuentra arraigada en el estado de Nevada es la geotermia, que como se mostrará más adelante abarca una cuota importante de generación, actualmente Nevada solo es superada por California en generación geotérmica a nivel nacional. A pesar de que el estado de Nevada sea conocido como una región muy calurosa y de poca precipitación, tiene en su poder una de las instalaciones hidroeléctricas más grandes del país, la presa Hoover, la cual se encuentra en la frontera entre Arizona y Nevada, tiene una capacidad de más de 1GW. A pesar de que el estado de Nevada tiene una zona montañosa con una flora marcadamente boscosa, lo cual convierte a dicha zona en la región con más potencial de viento en todo el estado, solo una pequeña parte del total de la energía es producida mediante tecnologías eólicas. En cuanto a tecnologías más convencionales, Nevada carece de reservas significativas de petróleo, gas natural, carbón, lo cual no quiere decir que luego no se empleen dichas tecnologías, de hecho, tal y como se verá más adelante, algunas de las tecnologías anteriormente nombradas conforman un porcentaje significativo de la generación total. Desde que en 1859 se descubrieron los yacimientos de plata y oro que tanta influencia han tenido sobre el estado de Nevada, la población no ha dejado de crecer a un ratio que se encuentra entre los más altos del país. Si se añade el hecho de que todavía es un estado

con un bajo ratio poblacional, se puede esperar que, en un futuro cercano, una demanda tanto de generación como electrificación energética se incrementen considerablemente, lo cual hace de dicho estado una región con gran potencial de inversiones en el sector. Sin embargo, la administración es propietaria de casi el 80% de las tierras que conforman el estado de Nevada y en consecuencia es la administración la entidad encargada de gestionar dichos, lo cual desincentiva y dificulta la inversión corporativa. Otro dato a recalcar es que la energía empleada por cada dólar que conforma el PIB del estado se encuentra por debajo de la media nacional, a pesar de que su economía se encuentra en constante crecimiento gracias a grandes desarrollos sectoriales en aeroespaciales, defensa, información, salud, industria, turismo etc.

Por último, en términos de consumo, Nevada se encuentra considerablemente por debajo de la media nacional a pesar de la gran cantidad de equipos de aire acondicionado que se emplean debido a las altas temperaturas. Se mostrará más adelante, pero conviene destacar que 1/3 del consumo energético del estado viene del sector del transporte, cuyo motor económico es principalmente el turismo. También destacar que 1/4 del consumo total proviene de los sectores residenciales e industriales, mientras que la restante energía es consumida principalmente por el sector comercial.

- **Electricidad:**

La principal fuente de generación energética en el estado de Nevada es el gas natural, concretamente, 8 de las 10 plantas de generación con mayor capacidad se basan en el empleo de gas natural para producir energía, al igual que 7 de las 10 plantas de generación que más energía neta producen. Como se verá a continuación, aproximadamente dos tercios de la energía neta generada provienen de la tecnología de gas natural[8]. En respuesta a la gran cantidad de agua que necesitan las plantas de gas natural para enfriarlas durante su operación y debido a la gran sequedad que caracteriza el estado de Nevada, las plantas de gas natural se caracterizan por el empleo de sistemas de optimización de agua. Dichos equipos pueden llegar a reciclar tres cuartos del agua empleada en el proceso de generación, si a estos sistemas de optimización se le añaden sistemas de enfriado que no requieren agua para su uso, el porcentaje de agua empleado

en estos casos puede llegar a ser aproximadamente un 7% del gastado en una planta convencional.

Las energías renovables producen tres décimos de la energía total consumida, las tecnologías de generación que tienen una presencia destacable en el mix energético son, la solar, la hidroeléctrica y la geotérmica. Dentro de las tecnologías de producción renovable, cabe destacar la solar, tanto térmica como fotovoltaica, que producen aproximadamente un séptimo de la energía neta generada. Por otro lado, la geotermia que actualmente es la segunda tecnología renovable que más energía produce, se sitúa con una cuota de producción de alrededor de un 10%. Por último, la cuota correspondiente a la energía hidroeléctrica se encuentra alrededor del 6%, siendo este porcentaje suministrado mayoritariamente por la presa Hoover, la instalación hidroeléctrica más grande del país.

Las plantas de generación impulsadas por la quema de carbón han tenido una relevancia importante sobre la cuota de generación energética durante las últimas décadas, sin embargo, el estado de Nevada ha promovido el cierre de dichas centrales hasta prácticamente eliminarlas del mix energético. En 2003 la energía producida mediante el carbón superaba la mitad del total consumido por la región, sin embargo, en 2019 dicho porcentaje se ha visto reducido drásticamente hasta un décimo del total. Actualmente destacan dos plantas de generación impulsadas por carbón, una de ellas se encuentra directamente vinculada a la industria de oro y plata, y por lo tanto no tiene una fecha concreta de cierre. La otra planta de carbón restante se encuentra al norte del estado, y su fecha estimada de cierre se sitúa en 2025.

El reparto de energía consumida entre los diferentes sectores económicos del estado de Nevada se encuentra repartido, prácticamente, de forma equitativa. Los principales sectores entre los que se divide el análisis de consumo son, el residencial, industrial y comercial. Del sector residencial cabe destacar que una de cada tres viviendas tiene un sistema de calefacción propio, lo cual implica que, en términos netos, el sector residencial destaque respecto al resto en cuanto a consumo. Por otro lado, el sector del transporte consumía una porción menor de energía con respecto al resto, sin embargo, debido al gran número de infraestructuras eléctricas que se están implantando en el

estado de Nevada, la cuota de consumo se esta equilibrando con el resto de sectores. Un dato a recalcar sobre el consumo de Nevada es que sus precios obtenidos en el mercado diario energético se encuentran entre los 10 más bajos del país.

Históricamente los niveles de consumo en Nevada han superado a la energía generado (en términos instantáneos), de ahí que Nevada tenga líneas de alta tensión que conectan la región con los estados vecinos, supliendo esa carencia energética interna con el apoyo energético de los estados colindantes. Antes de 2014 la red de transporte de Nevada se encontraba divididas en dos regiones separadas, una parte norte que suministraba, principalmente, electricidad a los núcleos urbanos de Elko y Remo, y otra parte sur, encargada de suministrar electricidad a la ciudad de Las Vegas. A finales de 2014 se decidió centralizar la red de transporte, y se construyó una línea de alta tensión que atraviesa todo el estado de norte a sur. Esta nueva conexión facilitó e incentivó la construcción de numerosos proyectos de energía renovable a lo largo de todo el estado de Nevada, gracias a esta nueva línea de transporte dichas plantas de generación pueden suministrar energía a centros urbanos que se encuentran a una distancia considerable de forma eficaz.

- **Energía Renovable**

Durante el año 2020, prácticamente un tercio de la energía total generada provino de fuentes renovables, como se ha comentado anteriormente las principales fuentes renovables presentes en el estado de Nevada son la solar, la geotérmica y la hidroeléctrica[8]. La energía solar está mostrando un potencial y un crecimiento abrumador durante estos últimos años, habiendo multiplicado por tres su nivel de generación entre 2015 y 2019, llegando a cubrir en 2019 la mitad de la producción renovable en dicho periodo. El estado de Nevada es líder a nivel nacional en cuanto a producción solar, estando entre los 5 estados con mayor capacidad solar.

Otra tecnología renovable en la que el estado de Nevada es líder a nivel nacional es la geotérmica a gran escala, siendo el segundo mayor generador del país después de California y produciendo mediante dicha tecnología un tercio de la energía total generada mediante fuentes renovables. En cuanto a geotermia se refiere, el estado de Nevada posee una tecnología única, una hibridación entre geotermia y solar, que como su propio

nombre indica combina ambas tecnologías para producir electricidad. En un inicio la instalación comenzó como una planta geotérmica únicamente, a posteriori se añadieron paneles solares fotovoltaicos, y en última instancia se sustituyeron dichos paneles por una central solar térmica. Fue en este último caso cuando se aplicó la hibridación de la central geotérmica con la térmica solar, empleando la energía solar obtenida para calentar el líquido del ciclo de geotermia.

Prácticamente el resto de la generación renovable proviene de centrales hidroeléctricas, principalmente de la presa Hoover, situada entre los estados de Arizona y Nevada, con una capacidad de 2080 MW que se divide de forma equitativa entre ambos estados.

El potencial eólico en el estado de Nevada esta muy limitado debido a que el estado posee el 80% de las tierras del estado, lo cuál significa que la implantación de cualquier instalación eólica requiere aprobación federal, siendo esto último de poco atractivo para los inversores. En 2015 se puso en funcionamiento el primer parque eólico del estado, con una capacidad de 150 MW.

- **Petróleo**

El estado de Nevada posee unas reservas de petróleo crudo de pequeño tamaño, de la misma forma, dichas reservas tienen unos niveles de explotación muy bajos. Prácticamente toda la explotación y producción de petróleo se ha llevado a cabo durante el siglo pasado, el descubrimiento de la primera reserva de petróleo llegó en 1954, sucediéndose durante los próximos años otros descubrimientos hasta 1983, cuando se descubrió la mayor reserva del estado en el Gran Cañón. El pico de producción de petróleo crudo llegó en 1990[8], cuando el estado producía 4 millones de barriles al año. A partir de ese punto la producción de crudo ha ido descendiendo hasta los 267 mil barriles anuales en 2019, un 0,01% de la producción nacional. Los productos petrolíferos llegan al estado mediante tuberías que abastecen los dos núcleos urbanos principales, por un lado, la ciudad de Las Vegas es abastecida mediante una tubería de petróleo procedente de Utah, mientras que la zona norte se abastece mediante un suministro procedente del estado de California. El sector del transporte es el principal consumidor de petróleo, empleando cuatro quintos del total aproximadamente. Cabe mencionar que

se emplean algunos complementos con el petróleo para reducir sus emisiones, en verano la gasolina vendida consiste en una mezcla baja en emisiones de carbono, lo cual promueve la formación de ozono. Por otro lado, el etanol es conocidamente empleado para oxigenar la mezcla de gasolina, generalmente en épocas de invierno.

En términos de consumo petrolífero, Nevada se encuentra entre los más bajos del estado, concretamente entre los 15 estados con niveles más bajos de consumo. La mayoría de dicho consumo está destinado al sector del transporte, mientras que el petróleo restante es consumido en un 12% de total por el sector industrial y un 3% por el sector comercial. El sector residencial tiene un consumo de petróleo únicamente del 1%, principalmente debido a que solo 3 de cada 100 viviendas emplean calderas propulsadas por productos derivados del petróleo, como el propano generalmente.

- **Gas Natural**

El estado de Nevada no posee reservas significativas de gas natural, de la misma forma, la producción de gas natural en el estado es prácticamente nula, la única fuente de producción de gas natural es mediante pozos de petróleo, que sigue muy lejos de suplir todo el consumo de gas natural necesario en la región. Dicha falta de gas natural es suplida mediante la importación de gas natural mediante tuberías interestatales, para ello existe una tubería que proviene desde el estado de Utah encargada de proporcionar gas natural a muchos de los estados vecinos. La mitad del gas natural proveniente del estado de Utah continua al estado de California, un cuarto de la carga se desvía al estado de Oregón, consumiéndose el cuarto restante en el estado de Nevada[8].

Actualmente, de todo el gas natural tanto generado como importado, el 65% es empleado por el sector eléctrico. Un 16% es consumido por el sector residencial, que comparado con el petróleo es una cuota considerablemente mayor, esto se debe principalmente a que 3 de cada 5 viviendas emplean gas natural para calentar sus casas. El consumo restante de gas natural se asocia con un 12% al sector comercial y con un 7% al sector industrial.

- **Carbón**

Actualmente no existen depósitos o minas de carbón en el estado de Nevada, todo el suministro de carbón importado al estado proviene de minas de carbón situadas en los estados de Wyoming, Utah y Colorado. Como es de esperar la producción de energía

mediante esta tecnología ha decrecido considerablemente durante los últimos años, de 2010 a 2019 se ha reducido a la mitad el consumo de carbón[8].

- **Mix Energético 2019**

Con el fin de clarificar y exponer de una forma más visual los datos mencionados anteriormente, a continuación, se exponen una serie de gráficas agrupando la información presentada con anterioridad. Únicamente se mostrarán datos actuales que pongan en contexto la situación presente en la que se encuentra el estado de Nevada.

A continuación, se muestra el mix energético de generación correspondiente al año 2019. Como se ha explicado anteriormente se puede observar una predominancia significativa del gas natural en la generación de electricidad, con prácticamente un 70% de la generación energética total. En segundo lugar, vienen las renovables, con un 20% del total de generación energética, una cuota que como veremos en el próximo apartado a seguido una tendencia creciente durante los últimos años. En tercer lugar, se encuentra el carbón, que todavía tiene una cuota a tener en cuenta dentro del sistema, pero el cierre de muchas de las centrales de carbón presentes en la región predice una disminución masiva de la cuota de producción eléctrica mediante la quema de carbón. En último lugar, la tecnología hidroeléctrica, con un 4,1% de la producción total, a pesar de ser una energía renovable no se engloba junto a las mismas en el mix dado que prácticamente la totalidad de su producción proviene de la presa Hoover, de esta forma se puede hacer un análisis más preciso sobre la evolución del mix energético en el estado.

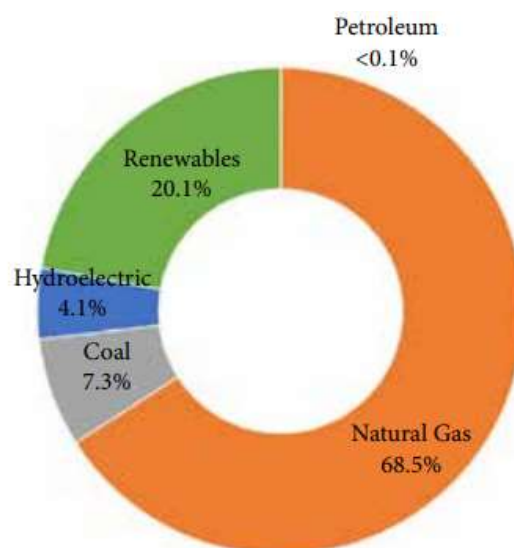


Figura 3-1: Mix Energético Nevada 2019[9]

En la siguiente gráfica se muestra, por un lado, la capacidad renovable asociada a cada tecnología y por otro la energía neta producida por cada una de las tecnologías renovables. Pasando a comentar las gráficas que se muestran a continuación, se puede observar la gran predominancia de la tecnología solar tanto en cuanto a capacidad como a generación neta, como se ha comentado anteriormente la energía solar esta experimentando un crecimiento exponencial durante los últimos años, siendo las previsiones que dicha tendencia siga su curso durante los próximos años. En segundo lugar, en cuanto a generación neta, que no en cuanto a capacidad, es la geotermia, que como se ha explicado con anterioridad es la tecnología que sin duda define el estado de Nevada a nivel nacional. También cabe destacar una importante cuota soportada por la tecnología hidroeléctrica, que como se ha mencionado ya, proviene de la producción eléctrica de la presa Hoover. Por último, se desea comentar que principalmente en cuanto a capacidad cabe destacar el “*Net Metering*”, entendiéndose como la capacidad de generación renovable que se encuentra a nivel de consumidor, pudiendo provenir esta de diferentes tecnologías como la solar o la geotérmica.

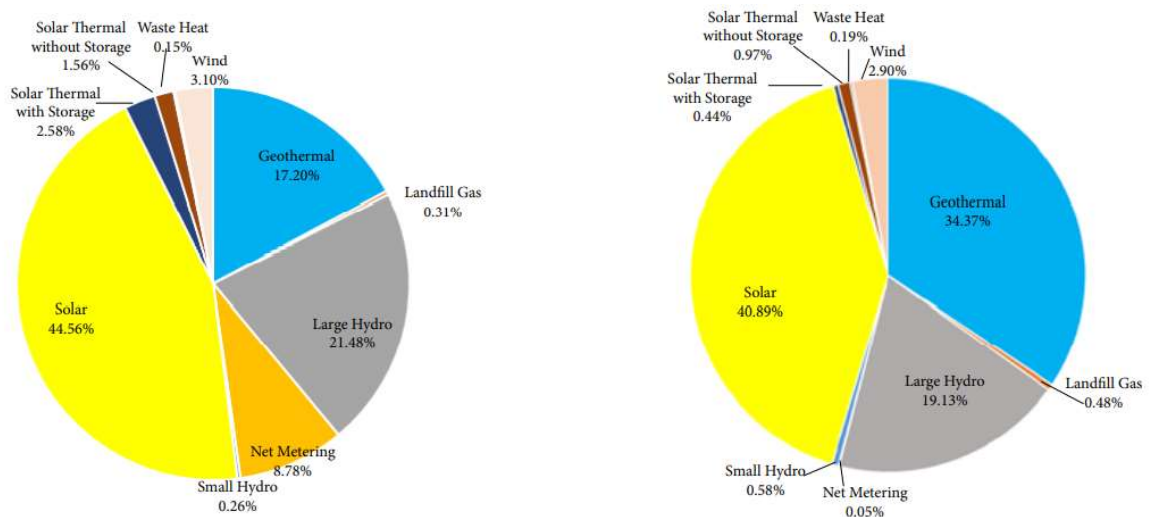


Figura 3-2: Capacidad/Generación renovable Nevada 2019[9]

En esta última gráfica se observa el porcentaje de la energía consumida por cada uno de los principales sectores económicos del estado. Como se ha comentado con anterioridad, el consumo energético de los cuatro sectores está distribuido de forma similar, observándose un ligero incremento en el consumo energético por el sector del transporte respecto al resto, debido principalmente al gran desarrollo que está experimentando este dentro del estado causado por el turismo y nuevas infraestructuras eléctricas. En segundo lugar, y con una cuota de consumo idéntica, están los sectores industrial y residencial. En último lugar se encuentra el sector comercial, con un 21% del consumo total, 10 puntos por debajo del sector del transporte.

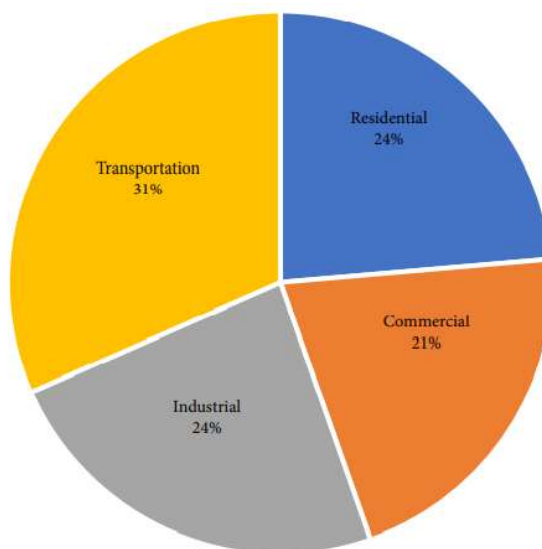


Figura 3-3: Consumo energético Nevada 2019[9]

- **Evolución del Mix**

El principal objetivo de este apartado consiste en describir y analizar la evolución energética que ha sufrido el estado de Nevada durante los últimos años. El periodo temporal analizado es el de los últimos 5 años, a pesar de que generalmente es un rango temporal escaso para observar modificaciones estructurales en los sistemas energéticos,

en el caso de Nevada se pueden observar ciertas tendencias que indican los posibles cambios a experimentar en el futuro.

En cuanto a la gráfica que muestra la evolución del mix energético, se pueden observar dos tendencias principales. En primer lugar, una tendencia decreciente de la producción de gas natural que, a pesar de ser la tecnología predominante en el sistema, se espera un decrecimiento constante pero no abrupto de la cuota de producción del gas natural. La segunda clara tendencia es el incremento de renovables que esta experimentando el sistema, en dicho caso si se podría afirmar que la tendencia creciente tiene una pendiente considerable, pasando de un 14% a un 20% en apenas 5 años, lo cuál supone de lejos el mayor cambio experimentado por una tecnología en el mix energético de Nevada. En un segundo plano, se encuentran tecnologías como el petróleo o el carbón, que se exponen a una tendencia bajista pero muy ligera que prácticamente no se aprecia en este periodo temporal.

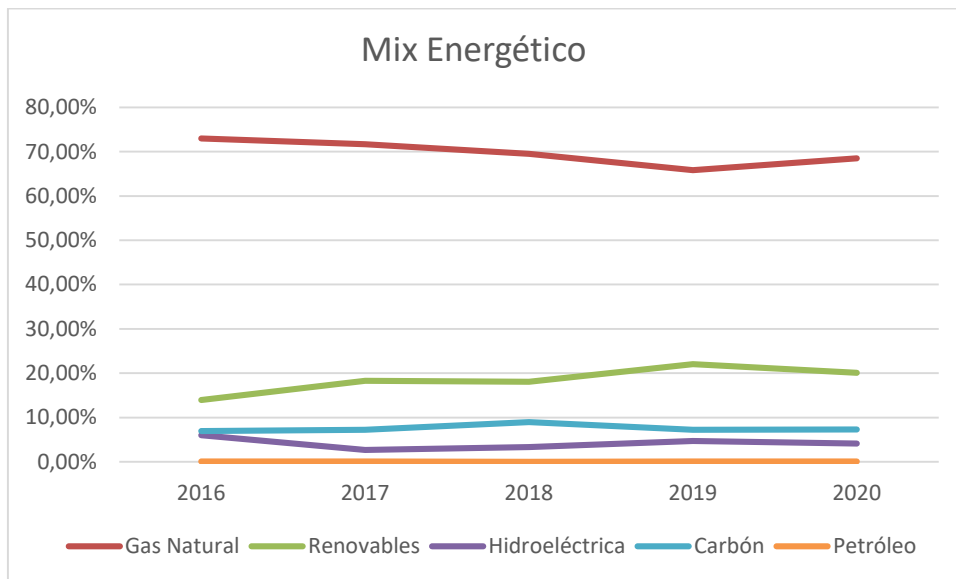


Figura 3-4: Evolución del mix energético Nevada[9][10][11][12][13]

La grafica que se muestra a continuación, se corresponde con las cuotas de consumo energético asignadas a cada uno de los cuatro sectores económicos principales. Como se ha comentado anteriormente las cuotas relacionadas con cada sector tienen relativamente una magnitud similar, con ciertos matices claro está. Si bien es cierto que el sector de

transporte destaca por tener un consumo significativamente mayor que el resto de sectores, también muestra una tendencia decreciente en dicho consumo. Lo contrario sucede con el sector comercial que, a pesar de tener el consumo energético más bajo de todos los sectores, su tendencia a lo largo de estos últimos años es de carácter ascendente. El consumo en los otros dos sectores sigue una tendencia similar a los descritos anteriormente, pero de forma más suave. En definitiva podría concluirse que la gráfica muestra un tendencia de convergencia en cuanto al consumo energético de los cuatro sectores económicos diferenciados en el estado de Nevada.

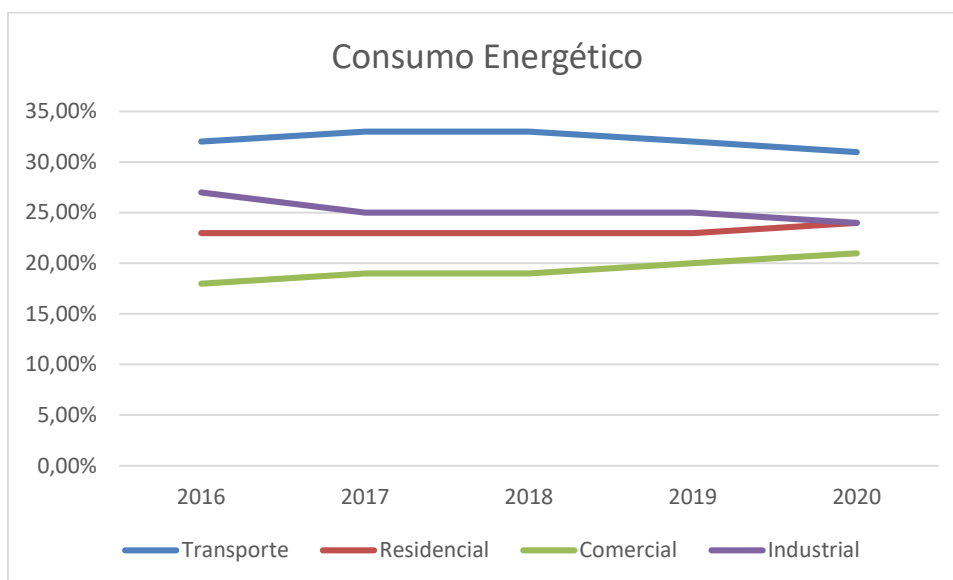


Figura 3-5: Evolución del consumo energético Nevada[9][10][11][12][13]

3.2 REQUERIMIENTOS DEL OPERADOR DEL SISTEMA

En el presente apartado se pretende describir de forma resumida cuales son las principales normas regulatorias que entraran en vigor durante los próximos años, así como alguno de los objetivos que se ha marcado como meta el sistema eléctrico del estado de Nevada. Tanto las mencionadas regulaciones como los objetivos propuestos por el operador del sistema, serán un importante indicador de en que dirección se van a mover las inversiones en el sector durante los próximos años.

Con el fin de proponer una serie de objetivos sobre las cuotas de producción renovable en el sistema, en 1997 se creó la *Renewable Portfolio Standard (RPS)*[8], lo que viene a ser en español, una normativa para la cartera de renovables del sistema. Dicha normativa es revisada constantemente para actualizar los requerimientos de energía renovable de tal forma que se ajusten a la situación actual del sistema. En 2009 se revisó la cartera de renovables, requiriendo que, el 25% de las ventas ejercidas por plantas de generación a gran escala, controladas por inversores privados, y por comercializadoras deben provenir de fuentes renovables para el año 2025. Además, el RPS requería que para 2015, al menos un 5% de energía proveniente de tecnologías solares y un mínimo de 6% para 2016, dichos porcentajes son sobre el total energético producido por tecnologías renovables, lo que equivale aproximadamente a un 1,5% de la generación total. Dichos porcentajes fueron sobradamente superados durante los años siguientes, llegando a producir un 14% de la energía total generada en el sistema durante el año 2019. Por último, en 2020 se llevó a cabo una modificación de la constitución estatal en la que se requiere que las empresas eléctricas deben de tener al menos un 50% de generación renovables dentro de su cartera de activos.

A continuación, se procederá a describir el principal marco regulatorio que envuelve a tanto la tecnología solar fotovoltaica como el almacenamiento energético mediante baterías principalmente, atendiendo principalmente a las restricciones y requerimientos marcados por el operador del sistema. En primer lugar, se describirán las normas regulatorias relacionadas con la tecnología solar.

- **NRS 704.7865[14] Ciertas empresas de electricidad están obligadas a ofrecer un programa a los clientes elegibles en el área de servicio; limitación del tamaño del programa; reglamentos que establecen las normas del programa; presentación del plan para implementar el programa; sitios preferidos para el desarrollo de recursos de energía solar a escala de servicio:**
 1. Las compañías eléctricas ofrecerán un programa de acceso solar a todos los consumidores que se encuentren dentro de su área de operación, de acuerdo a las características y restricciones que presente la sección en la cual se va a desarrollar la planta fotovoltaica. El tamaño de las plantas de generación no debe exceder:

- 240 MW para aquellas instalaciones que vayan a proveer energía a núcleos de urbanos densamente poblados.
 - 160 MW para aquellas instalaciones que vayan a proveer energía a núcleos urbanos con una baja densidad de población.
2. La Comisión debe adoptar ciertas regulaciones con el fin de establecer ciertos requerimientos de acceso para el programa de expansión solar con la intención de:
- Promover el desarrollo de la energía solar en el estado de Nevada, tanto a gran escala como en el nivel de distribución, con el fin de alcanzar un nivel de producción solar considerable a ambos niveles.
 - Establecer un plan para involucrar a la comunidad en el desarrollo de la energía solar a nivel del consumidor.
 - Proponer programas de formación para que los trabajadores que desarrollan su labor en el entorno de la energía solar puedan aprender las nuevas tendencias de innovación, construcción, mantenimiento y operación, de tal forma que haya difusión del conocimiento entre la comunidad, con el fin de acelerar el proceso de desarrollo de la energía solar en Nevada.
 - Proporcionar un acceso a la energía solar justo y equitativo.
 - Establecer un programa de acceso a la energía solar basado en un ratio calculado para cada consumidor con las siguientes características. Se encuentra basado, entre otras cosas, en las nuevas instalaciones de generación solar aprobadas por la Comisión. Es una tarifa fija que sustituye a la tarifa básica de energía y al ajuste contable diferido que cobra la compañía eléctrica a los consumidores y que se ajusta de acuerdo a los cálculos trimestrales de la Comisión. Aquellos consumidores con un bajo nivel de ingresos, se les asigna una tarifa un ratio de pago menor, el cual es suplido entre el resto de consumidores con un ratio de pago estándar. Por otro lado, aquellos consumidores que tienen un ratio estándar, se les ofrece un servicio marcado por la estabilidad y la predictibilidad, además de existir la posibilidad de tener una tarifa de bajo coste. Sin embargo, a este ratio tarifario se le pueden añadir otro tipo de cargos sin limitación, como puede

ser el cargo de energía universal, tasas de franquicia, tasa del programa de generación renovable etc. Con la excepción de que dichos cargos se pueden cancelar en caso de que el consumidor tenga un bajo nivel de ingresos.

- Establecer un proceso para identificar ubicaciones geográficas no contiguas en las cuales sea posible establecer instalaciones de generación solar, siempre priorizando aquellas zonas donde el nivel medio de ingresos sea menor.
- Las empresas eléctricas deben proveer a la comunidad con al menos una instalación solar de gran escala y al menos con tres instalaciones en el nivel de distribución.
- Se requiere que al menos el 50% de los trabajadores involucrados en la construcción de instalaciones fotovoltaicas sean residentes en el estado de Nevada.
- Establecer un mecanismo para que los emplazamientos de generación solar a nivel del consumidor empleados por las empresas eléctricas reciban una remuneración por el uso de dichos emplazamientos.
- Aceptar el empleo de la combinación entre instalaciones de generación renovable ya sea a nivel de distribución o a nivel de transporte.
- Establecer un proceso de aplicación y de selección de clientes que podrán acceder al programa, la selección de dichos clientes se realizará de forma equitativa.
- Garantizar que los clientes pueden participar en el programa independientemente de si son dueños o alquilan sus instalaciones.
- Se debe requerir que, el 25% de la capacidad del programa se reserve para clientes con dificultades económicas o con bajos niveles de ingresos, otro 25% para negocios en dificultades económicas y organizaciones benéficas, mientras que el 50% restante se asignará a consumidores residenciales que han superado el proceso de selección y que no tienen la capacidad de instalar energía solar en sus residencias.

- Establecer un proceso para certificar que un residente no puede instalar capacidad solar en su residencia.
 - Establecer unos requerimientos en cuanto al formato, el contenido y la manera de presentar un plan, por parte de las eléctricas, para implementar el programa de acceso solar.
3. La empresa eléctrica en cuestión tendrá que presentar un plan de cumplimiento de las regulaciones especificadas en los apartados anteriores si desea acceder al programa de acceso solar.
 4. La Comisión evaluará el documento de cumplimiento emitido por la empresa eléctrica, pudiendo aceptarlo, modificarlo o denegarlo en caso de que dicho informe no satisfaga los requerimientos especificados en el apartado dos.
 5. La empresa eléctrica junto a la Comisión, eligen una serie de emplazamientos establecidos como Zonas de Energía Solar por el Secretario de Interior y que actualmente son gestionados por la Junta de Terrenos.
- **NRS 704.795[14] La Comisión está obligada a determinar si los objetivos de adquisición de sistemas de almacenamiento de energía por parte de la empresa eléctrica son de interés público; factores necesarios a considerar; cálculo de beneficios y costes:**
 1. En 2018, la Comisión tuvo que determinar si era de interés público el hecho de implementar una serie de regulaciones que establezcan unos objetivos en cuanto a sistemas de almacenamiento se refiere.
 2. Para determinar en efecto si la instalación de sistemas de almacenamiento es de beneficio público, la Comisión debe considerar:
 - Si la implementación de sistemas de almacenamiento cumplirá con los requisitos descritos a continuación. En primer lugar, apoyar la integración de las energías renovables mediante la mitigación de la generación intermitente que caracteriza a las renovables. Mejorar la fiabilidad en las redes de transmisión y distribución del sistema. Promover un incremento del uso de recursos renovables para generar electricidad, además de reducir las

necesidades energéticas en los picos de demanda. Ocasionar un ahorro en las inversiones orientadas a generación, transmisión y distribución. Promover la sustitución de tecnologías contaminantes en los servicios auxiliares por sistemas de almacenamiento energético, de carácter sostenible. Por último, que dichos sistemas de almacenamiento actúen como reductores de las emisiones de efecto invernadero.

- Se tendrá en cuenta las restricciones de interconexión de los sistemas de almacenamiento a todos los niveles, transmisión, distribución e incluso a nivel del consumidor.
3. Con el fin de valorar si la implementación de sistemas de almacenamiento es de interés público, la Comisión tendrá que determinar si el coste de implementar dichos sistemas es mayor que el beneficio obtenido por los consumidores. Para realizar dicha consideración la Comisión tendrá en cuenta los siguientes aspectos:
- La reducción en la necesidad de capacidad de generación adicional en los picos de demanda del sistema.
 - Reducciones en pérdidas localizadas en las líneas de transporte.
 - Beneficios y costes provenientes de la participación en los servicios auxiliares.
 - Reducción de costes por la ausencia de necesidad adicional de capacidad de generación y transmisión.
 - Beneficios obtenidos de la reducción de emisiones de efecto invernadero y otros gases perjudiciales.
 - Reducción de costes debido al soporte que estos sistemas aportan al perfil de tensiones.
 - Los beneficios que implica el hecho de tener una mayor diversificación en cuanto a fuentes de generación se refiere.
 - Los costes administrativos incurridos por la empresa eléctrica a la hora de poner en funcionamiento los sistemas de almacenamiento.
 - El coste incurrido por la empresa eléctrica a la hora de gestionar las interconexiones del sistema de almacenamiento con la red.

- El coste de los propios sistemas de almacenamiento energético.

- **NRS 704.796[14] La Comisión adoptará normas relativas a la adquisición de sistemas de almacenamiento de energía si los objetivos de dichos sistemas por parte de la empresa eléctrica son de interés público:** Si la Comisión llega a la conclusión de que la implementación del sistema de almacenamiento en cuestión es de interés público, entonces, la Comisión tendrá que adoptar el siguiente marco regulatorio.
 1. Establecer objetivos o metas para el sistema de almacenamiento energético.
 2. Establecer los puntos de conexión del sistema de almacenamiento con la red eléctrica.
 3. Aclarar que los sistemas de almacenamiento pueden ser propiedad de tanto la empresa eléctrica como cualquier otro individuo.
 4. Establecer los requisitos para la presentación de los planes propuestos por las empresas eléctricas con el fin de alcanzar los objetivos y metas esperados de los sistemas de almacenamiento.
 5. Definir el proceso mediante el cual la Comisión, cada tres años, reevaluará los objetivos y metas establecidos para los sistemas de almacenamiento.
 6. Establecer un proceso mediante el cual las empresas eléctricas sufran una disminución en la exigencia de sus objetivos y metas, en caso de que los sistemas de almacenamiento no estén siendo capaces de alcanzar dichos requerimientos y por lo tanto estén siendo un coste para el sistema.

- **NRS 704.797[14] Requisitos para que los sistemas de almacenamiento de energía adquiridos puedan cumplir sus objetivos.**
 1. Si la Comisión adopta normas regulatorias para asegurar el cumplimiento de los objetivos y metas exigidos a los sistemas de almacenamiento, con el fin de cumplir dichos requerimientos, los sistemas de almacenamiento podrán gestionar la energía de forma tanto centralizada como descentralizada, siendo estos propiedad de las empresas eléctricas que los administran o de cualquier individuo.

2. Sistemas de almacenamiento energético gestionados por empresas eléctricas, con la obligación de cumplir una serie de objetivos establecidos, tendrán que:
- Reducir los picos de demanda del sistema.
 - Eliminar inversiones adicionales en la generación, transmisión y distribución del sistema.
 - Mejorar la fiabilidad operacional de la red de transmisión y distribución.
 - Reducir las emisiones de gases perjudiciales para el medio ambiente.
 - Mejorar la integración de las energías renovables en la red.

3.3 ESTUDIO DE CASO SIMILAR (CAISO)

Actualmente la región de California (CAISO) es el cuarto estado que más energía neta produce a nivel nacional, aproximadamente un 5% del total energético producido a gran escala en el año 2019. En cuanto al mix energético del Estado, destaca la generación mediante fuentes renovables, que constituye más de la mitad energía producida en el estado de California, incluyendo principalmente a tecnologías como la hidroeléctrica o plantas solares fotovoltaicas de pequeña escala. Aquellas plantas que producen energía mediante gas natural constituyen aproximadamente un 40% de la energía total generada en la región, mientras que la nuclear apenas genera un 10% del total, caracterizada por una tendencia descendente durante los últimos años[15].

California es el segundo estado en capacidad de generación hidroeléctrica después de Washington, como es de esperar, en 2019 California fue el segundo mayor productor de energía hidroeléctrica. Sin embargo, la aportación de dicha tecnología al sistema es muy variable, de hecho, en 2015 debido a una marcada sequía, la tecnología hidroeléctrica suministró únicamente un 7% del total. También se dan casos opuestos, el año 2019 estuvo marcado por fuertes precipitaciones, llegando a producir un 19% de la energía total generada en el estado. Dichas variaciones en la generación hidroeléctrica sumado a la reducción de energía nuclear, ha dado paso a que otras tecnologías renovables abarquen una cuota mayor de producción. Dichas tecnologías renovables son principalmente la solar, la eólica y la geotérmica, habiendo producido un 30% del total durante el año 2019. El carbón es una

fuerza energética con prácticamente nula presencia en el sistema CAISO, apenas un 0,1% de total se produce mediante plantas de carbón, siendo todas estas instalaciones de cogeneración empleadas a nivel industrial[15].

En 2019, California fue el estado con mayor porcentaje de energía importada desde plantas de generación que se encuentran fuera del estado, concretamente un 28% del total, estando compuesto dicho porcentaje en un 70% por energía renovable. Aproximadamente un 10% de la energía importada proviene de plantas propulsadas por carbón, lo cual es una cuota considerable teniendo en cuenta que en el estado no se produce más de un 0,1%, sin embargo, la cuota total de producción energética mediante carbón no sobrepasa el 3%. El decremento de producción energética mediante el carbón, que como se ha comentado anteriormente, es una tendencia muy marcada en el estado, lo está siendo también para aquellas plantas que exportan energía al estado de California. Dicha tendencia se debe principalmente a la puesta en vigor de una ley estatal en 2016 que limita las emisiones producidas por las plantas de generación, haciendo dichos requerimientos más estrictos según pasa el tiempo, de ahí que se prevé que en 2026 no exista generación eléctrica mediante la quema de carbón.

Actualmente California es el segundo estado con mayor número de ventas en el país, después de Texas, a pesar de ello, tiene el menor ratio de ventas per cápita de la nación, además, tiene uno de los precios más altos de la nación, colocándose en séptimo puesto en este aspecto. En cuanto a consumo energético, el sector comercial constituye aproximadamente la mitad de las ventas del estado, a continuación le sigue el sector residencial con un 25% de las ventas en California, donde gran parte del consumo es debido al uso de equipos de acondicionamiento del aire en viviendas. El resto de ventas se localizan principalmente en el sector industrial, siendo el consumo en el transporte muy reducido. California tiene un programa de incentivos para acelerar la transición al uso de coches impulsados por energía eléctrica, gracias a dicho programa actualmente California tiene casi 600.000 vehículos eléctricos o híbridos y aproximadamente un 25% de todos los puntos de recarga eléctrica de la nación[15]. A continuación se adjunta una gráfica que muestra de una forma más visual el mix energético del estado de California en 2020.

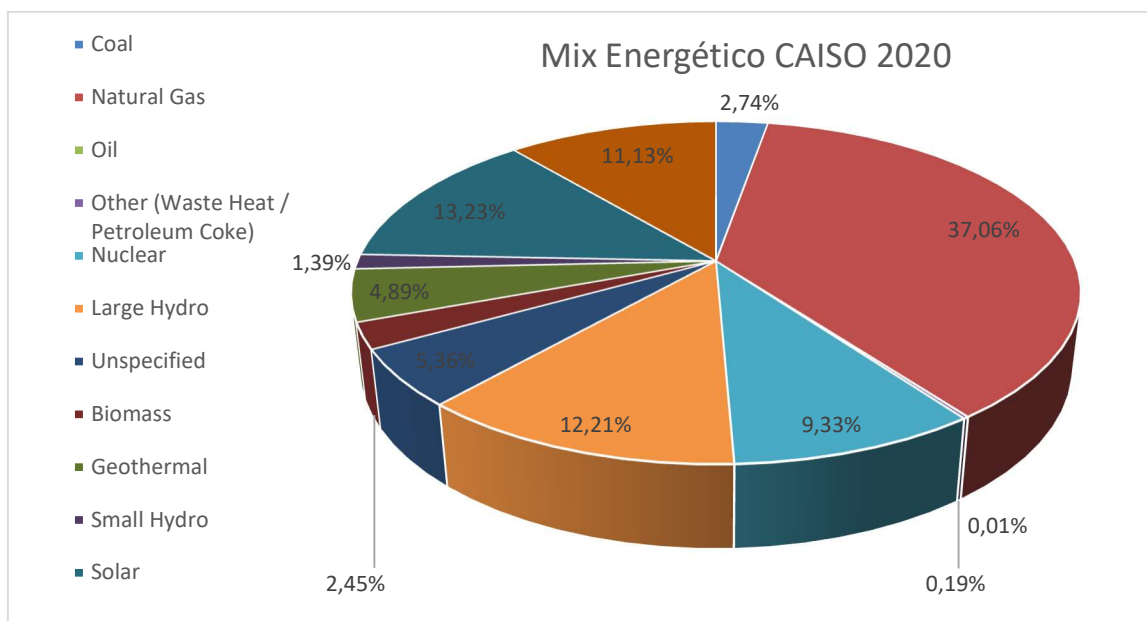


Figura 3-6: Mix energético CAISO 2020[16]

En 2019, la región de California fue el estado que más energía renovable generó de toda la nación, destacando una importante participación de tecnologías como la hidroeléctrica y la solar a nivel de distribución. Dicha predominancia a nivel nacional en términos de renovables se ve reflejada también en el hecho de que el sistema CAISO es el estado con mayor producción de energía solar, geotérmica y de biomasa. Además, es el segundo estado de la nación con mayor generación hidroeléctrica[15].

Los mayores recursos solares de California se localizan en los desiertos del sudeste, dónde se encuentran todas las instalaciones solares, tanto las térmicas como las fotovoltaicas de gran escala, sin embargo, instalaciones fotovoltaicas se localizan a lo largo de todo el estado, eso sí, a nivel del consumidor. En 2014, el estado de California se convirtió el primero en producir un 5% de su generación total mediante recursos solares, alcanzando un 14% en 2019, lo que supone un incremento abismal en apenas 5 años. Si además se le añade la generación producida por plantas solares a pequeña escala, la cuota total de generación mediante recursos solares asciende a un 20% en 2019. En noviembre de 2020 California tenía bajo operación 13 GW de potencia solar a gran escala, más que en cualquier otro estado

de la nación, si se le añadiese la capacidad solar a pequeña escala el número ascendería a 24 GW, casi el doble.

El estado de California esta consolidado como el mayor productor energético mediante recursos geotérmicos, con una cuota del 75% de la energía total producida en la nación mediante tecnologías de geotermia. A nivel estatal, la energía geotérmica producida equivale a un 6% de la energía producida en el sistema CAISO, proviniendo dicha energía de los 1800 MW de capacidad geotérmica instalada. La localización de las plantas geotérmica se concentra en cuatro zonas principales del estado, que como es de esperar, se caracterizan por alta actividad volcánica. En cuanto a instalación representativas destaca la de Geysers, localizada en las Montañas Mayacamas, siendo la instalación geotérmica más grande del mundo con una capacidad de 725 MW[15].

El estado de California lidera la nación en cuanto a producción energética mediante biomasa, produciendo aproximadamente un 60% de la energía generada mediante geotermia a nivel nacional. A nivel nacional la producción geotérmica alcanza el 3% del total, proviniendo dicha cantidad de energía de 30 plantas propulsadas mediante la quema de madera, y otras 80 plantas propulsadas mediante la quema de gases y materia sólida proveniente de vertederos. Como dato de interés, mencionar que 180 000 viviendas en California emplean madera como su principal fuente de combustible para calefactar sus casas.

Tecnologías eólicas suministraron durante 2019, un 7% de la energía total producida a nivel estatal, siendo este un dato anómalo dado que de forma rutinaria la eólica produce un 5% de la energía estatal. En el mismo año, California se situó entre los 5 estados con mayor producción eólica del país. La distribución de las turbinas eólicas es muy variada y diversificada, teniendo presencia en zonas montañosas con grandes corrientes de viento, pero también en zonas costeras, sobre todo en el norte, tanto terrestres como marinas. En noviembre de 2020 California declaró una potencia eólica instalada de 6 GW.

El estado de California ha tenido durante las últimas décadas gran interés por el bienestar del medioambiente, en consecuencia, en 2006 se aprobó el Global Warming Solutions Act mediante el cual se establecían ciertas restricciones sobre las emisiones de efecto invernadero, dichas restricciones u objetivos se van actualizando o en función del tiempo transcurrido. Para facilitar el cumplimiento de los nombrados objetivos el sistema CAISO

adoptó un mercado de permisos de emisiones de tal forma que los diferentes agentes del sistema pudieran intercambiarse dichos permisos[15]. A continuación se muestra de forma más visual las cuotas de generación que sostienen cada una de las tecnologías de origen renovable.

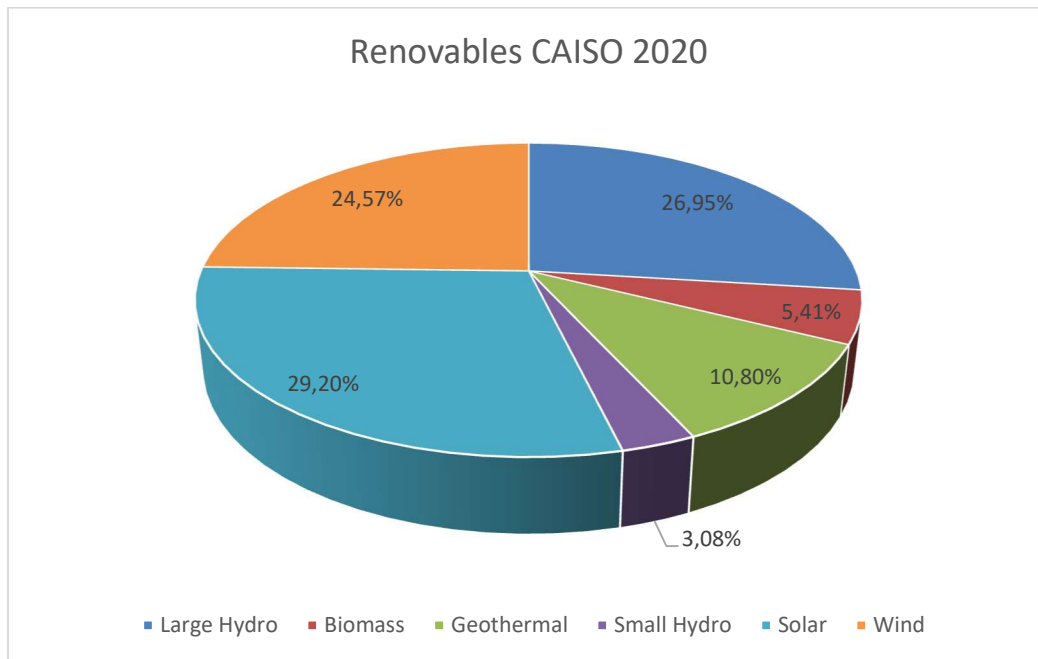


Figura 3-7: Mix energético de renovables CAISO 2020[16]

La siguiente parte consiste en la representación de la evolución que ha sufrido el sistema CAISO durante los últimos años, en cuanto a cuotas de generación del mix energético. Como se puede observar en la gráfica que se muestra a continuación, la tendencia general que ha seguido el sistema CAISO, que principalmente se basa en la evolución de la generación renovable frente a la generación convencional, está marcada por un incremento muy marcado de la generación renovable. En 2014 la cuota de generación renovable apenas se situaba en el 25%, mientras que en 2020, se sitúa cerca del 50%, llegando por lo tanto a ser la cantidad de energía producida mediante fuentes renovables prácticamente la misma que la producida por fuentes convencionales, un dato que es difícilmente observable hoy en día en otros sistemas energéticos. Según las tendencias observadas es esperable que durante los próximos tres años, la cuota de renovables sobrepase a la de energías convencionales.

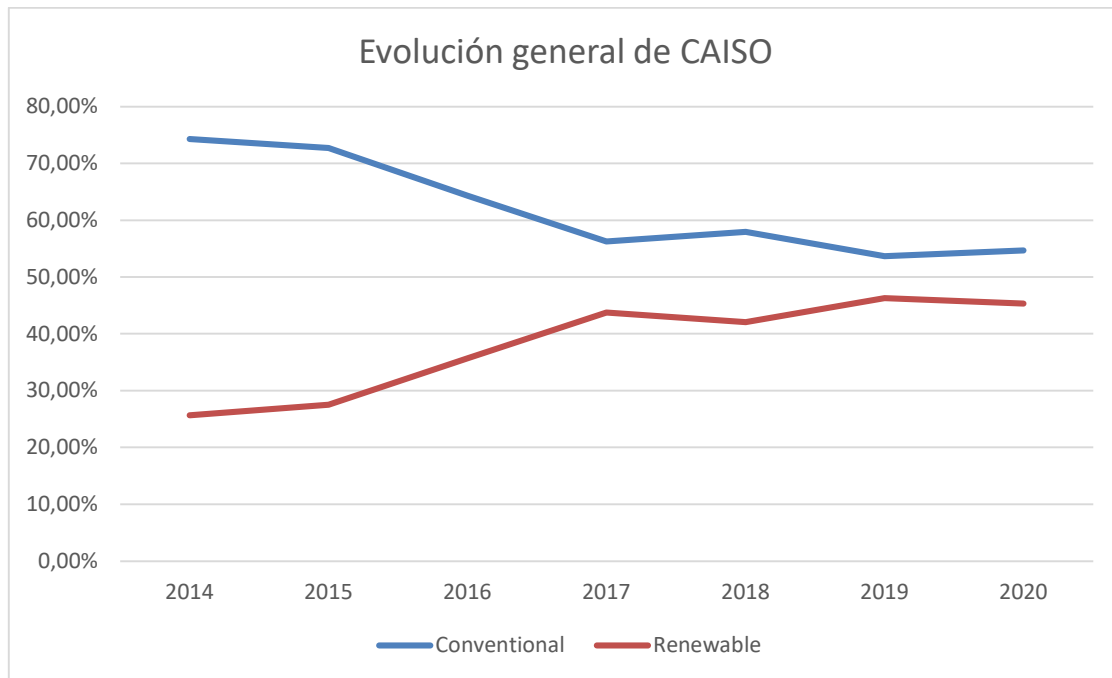


Figura 3-8: Evolución en la generación energética de renovables y tecnologías convencionales[16]

En la siguiente gráfica puede observarse la evolución que han ido sufriendo las diferentes tecnologías de generación a lo largo de estos últimos 6 años, en cuanto a cuota de generación se refiere. Después de ver la tendencia que ha seguido la generación renovable en la gráfica previamente mostrada, es de esperar que las tecnologías que funcionan a partir de fuentes renovable sigan dicha tendencia, mientras que las que proceden de fuentes convencionales, no lo hagan. En efecto, se puede observar como la solar, la eólica, la biomasa e incluso la hidroeléctrica han experimentado una tendencia constante positiva, siendo la de algunas más abrupta que la de otras, sin embargo, todas positivas. De entre ellas destaca la tecnología solar por su exponencial incremento de forma anual, llegando a situarse como la tecnología renovable con mayor cuota de generación. También cabría destacar la hidroeléctrica que, si bien es cierto que su producción varía significativamente en función del año, en términos generales podría decirse que la tendencia de producción que esta siguiendo dicha tecnología es marcadamente positiva. Pasando a comentar las tecnologías más perjudicadas por la transición energética, estarían en primer lugar, el carbón y el gas natural, experimentando

ambas una tendencia decreciente sin precedentes. A pesar de ello el gas natural sigue manteniéndose como la principal fuente de producción eléctrica.

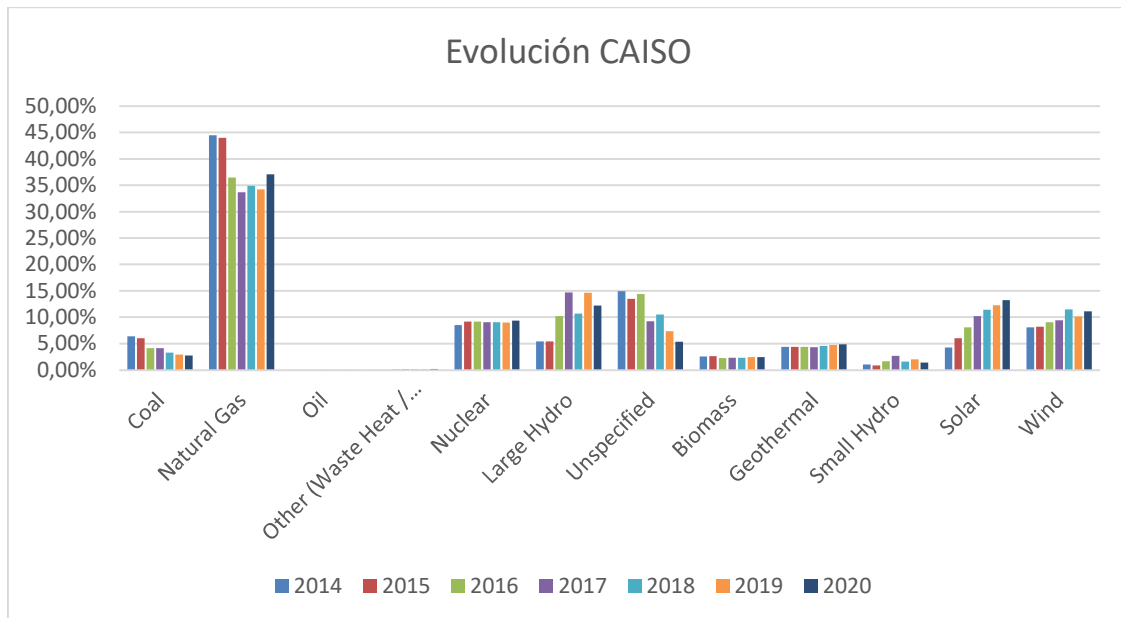


Figura 3-9: Evolución de la generación energética por tecnologías[16]

A pesar de haber descrito con cierta profundidad las características del sistema CAISO a largo plazo, se considera conveniente mantener presente lo que sucede de forma diaria en el mercado eléctrico del estado de California. En la siguiente gráfica se muestra el mix energético que presenta el sistema CAISO de forma diaria. Se observa como las tecnologías renovables juegan un papel muy estándar hasta que comienzan las horas de luz, en dicho momento la producción renovable llega incluso hasta triplicarse, valiéndose por si misma para suministrar prácticamente la mitad de la energía que requiere el sistema. Cuando acaban las horas de luz, la producción renovable disminuye hasta su valor estándar. El principal problema que supone una subida y una bajada de generación tan abruptas es que dificulta la adaptación del resto de tecnologías convencionales a dichos picos de producción. Generalmente las tecnologías convencionales están limitadas por rampas de subida y bajada, es decir, no pueden aumentar o disminuir su producción más de un valor concreto por unidad de tiempo. En este sistema, se alcanzan dichos límites de forma habitual, lo cuál genera numerosas pérdidas para el sistema, en primer lugar, fuerza a las plantas de generación a

variar su generación de forma instantánea y veloz, lo cuál lleva provoca que dichas plantas operen en sus límites técnicos y por lo tanto estén expuestas a costes adicionales. Por otro lado, provoca momentos de exceso y necesidad energética, provocando sobrecostes a la hora de importar energía de otros sistemas cuando hay necesidad energética, o sobrecostes cuando se sobrecarga el sistema por exceso de producción, apareciendo pérdidas en las líneas y ineficiencias por llevar equipos de la red a sus límites técnicos.

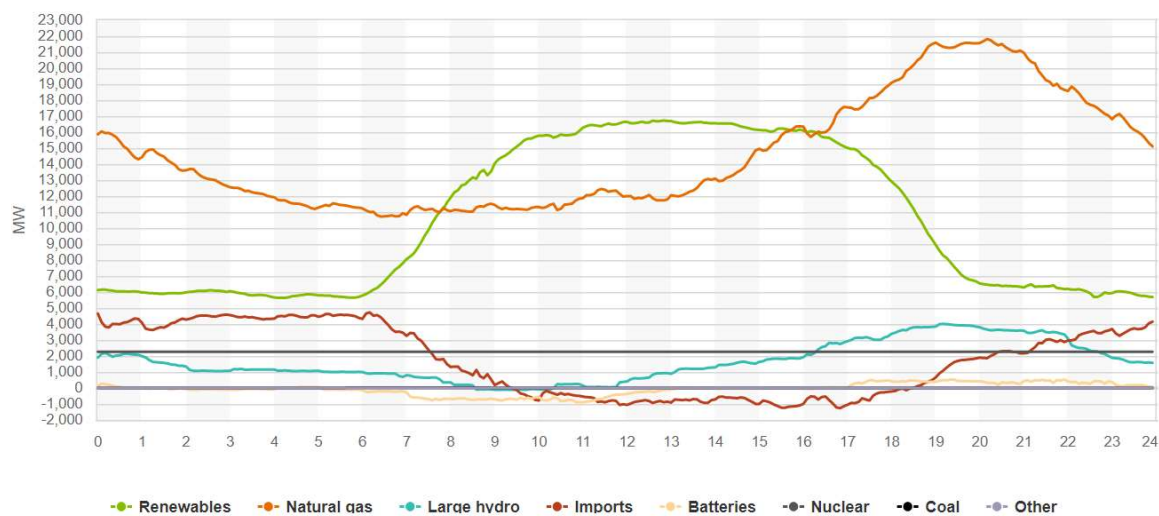


Figura 3-10: Mix energético diario[17]

La siguiente gráfica describe el origen de la generación renovable del sistema CAISO, exactamente el mismo día del cual se ha obtenido la gráfica anterior. Como se puede observar la energía solar es la principal protagonista del diagrama, presentando un pico de generación durante las horas de luz, que supera con creces a cualquier otra fuente de generación renovable, pero que a su vez causa los problemas de integración mencionados anteriormente.

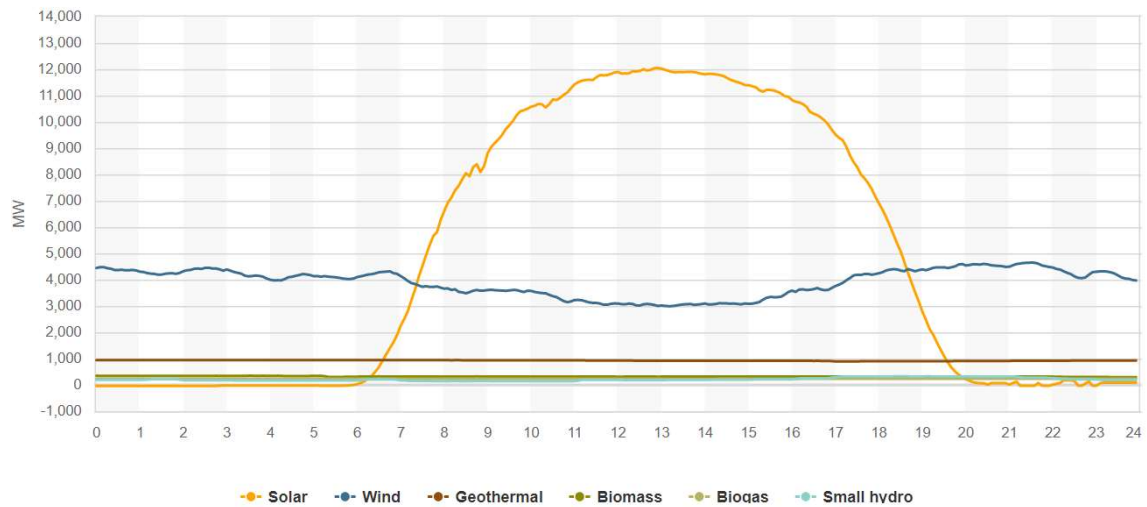


Figura 3-11: Mix energético diario de renovables[18]

Una de las soluciones propuestas por el operador del sistema CAISO para evitar los problemas de integración que tiene la energía solar, consiste en la implantación de sistemas de almacenamiento de baterías, que sean capaces de absorber energía de la red en momento de exceso energético para luego inyectarlo cuando sea necesario, aligerando la responsabilidad de las plantas convencionales y la energía importada. Hoy en día, el operador del sistema ha establecido de forma obligatoria que los tres productores principales energéticos tengan una capacidad mínima de almacenamiento. Sin embargo, la capacidad de almacenamiento actual en el sistema no es suficiente para hacer frente al problema que esta ocasionando la solar, y por lo tanto se requiere una mayor inversión en almacenamiento dado que actualmente su rentabilidad económica es muy baja e incluso nula. A continuación se muestra el perfil energético de las baterías en el sistema CAISO.

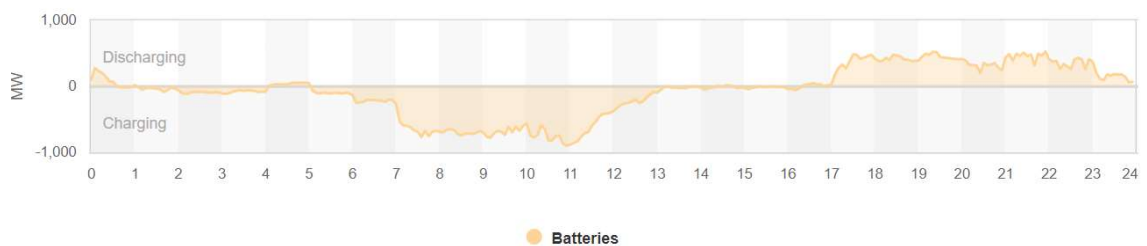


Figura 3-12: Perfil energético diario de baterías[19]

Chapter 4. ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN BATERÍAS (BESS)

4.1 ESTADO DEL ARTE

El almacenamiento de energía eléctrica ha sido uno de los mayores desafíos a los que se ha enfrentado el sector eléctrico durante estas últimas décadas, dicho problema ha impactado no solo al sector energético, sino también a otros sectores económicos como la industria, que se caracterizan por tener cierta dependencia energética. Sin embargo, es necesario destacar el hecho de que ha habido un gran avance hacia el desarrollo de sistemas de almacenamiento energético cuyas nuevas aplicaciones se extienden a lo largo de numerosos sectores, algunas de ellas pueden ser, el empleo de sistemas de almacenamiento en coches eléctricos e híbridos, sistemas de almacenamiento a gran escala, mejora de sistemas de almacenamiento de uso electrónico y el almacenamiento de electricidad producida por fuentes renovables como la solar y la eólica. La necesidad de sistemas de almacenamiento para afrontar los perfiles de generación variable ha generado la aparición de nuevas tecnologías que, complementándose, pueden ofrecer fiabilidad y productividad al sistema mediante el empleo de fuentes renovables. Los sistemas de almacenamiento tienen la capacidad de suplir la creciente demanda energética mediante el balance de las fluctuaciones presente en la generación. Para eventos a corto plazo, los sistemas de almacenamiento pueden aportar servicios de control y estabilidad de frecuencia, mientras que en el largo plazo, son capaces de proveer servicios de reservas o gestión energética. También pueden emplearse para complementar la generación primaria, almacenando la energía producida en periodos de sobre generación para después emplearla en periodos de escasez energética. En definitiva, los sistemas de almacenamiento pueden jugar distintos roles proveer con distintos servicios a los sistemas de energía eléctrica.

ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN BATERÍAS (BESS)

Pasando ahora a comentar el panorama internacional del mercado de las baterías, cabe destacar que por primera vez en la pasada década ha habido una decaída en las instalaciones llevadas a cabo durante el año 2019[21]. Concretamente, de dicha caída en las instalaciones se asocia un 20% a baterías conectadas a la red, mientras que el número de instalaciones de baterías a nivel del consumidor se han mantenido constantes, a pesar de que se hayan duplicado el número de instalaciones de baterías residenciales con respecto al año anterior. Lo dicho anteriormente confirma la entrada de una nueva tendencia en el sector de almacenamiento, en la cual cada vez más predominan las baterías a nivel del consumidor, antes que los módulos de almacenamiento a gran escala. La evolución del mercado de baterías ha seguido la misma tendencia de incertidumbre que ha caracterizado el año 2018, dónde Corea ha visto incrementada su actividad considerablemente, mientras que en Estados Unidos y Europa la actividad ha sido muy reducida a pesar de ser las regiones con mayores cuotas de mercado de almacenamiento del mundo[20]. Lo sucedido durante el año 2019 demuestra nuevamente la fragilidad a la que se encuentran sujetas las tecnologías de almacenamiento mediante baterías, principalmente debido a la dependencia de estas en las políticas aplicadas que incentiven el empleo de esta tecnología mediante mercados o incentivos directos.

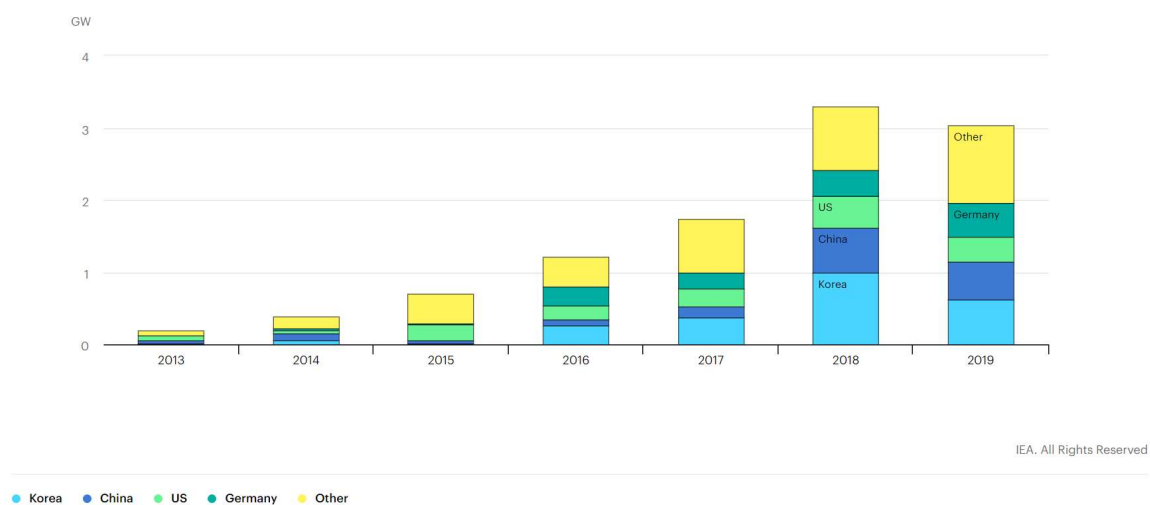


Figura 4-1: Evolución en el despliegue de baterías[20]

ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN BATERÍAS (BESS)

Los principales tipos de técnicas empleadas para almacenar energía se dividen en función del método que emplean para almacenar dicha energía, pudiendo ser, mecánicas, químicas y térmicas. Cada tecnología de almacenamiento presenta unas características técnicas y económicas en función de las aplicaciones que se le vayan a dar al equipamiento en cuestión. En este aspecto las tecnologías de almacenamiento pueden dividirse en cuatro categorías:

1. Aplicaciones de baja potencia en áreas de aislamiento, principalmente empleados en equipos de emergencia o hospitales, es decir, en elementos de primera necesidad.
2. Aplicaciones de media potencia en áreas de aislamiento, elementos de soporte energético a nivel residencial o incluso a nivel urbano.
3. Aplicaciones que conllevan la conexión directa de los sistemas de almacenamiento a la red con funciones de balance.
4. Control de calidad de potencia.

Generalmente las dos primeras categorías se emplean a pequeña escala, principalmente debido a la limitada capacidad de almacenamiento energético que presentan las tecnologías asociadas a estas categorías, que a su vez limitan su capacidad de gestión sobre la propia energía. Al contrario sucede con las dos categorías restantes, que gracias a su mayor capacidad de almacenamiento se emplean en sistemas a gran escala, además de presentar una importante capacidad de gestión de la energía[21]. A continuación se nombran las principales tecnologías empleadas en los sistemas de almacenamiento energético.

- I. Volante de Inercia, se basa en el almacenamiento de energía cinética.
- II. Almacenamiento de energía magnética superconductora, consiste en el almacenamiento energético mediante una bobina superconductora que se mantiene a temperaturas criogénicas mediante un refrigerador.
- III. Supercondensadores, se emplean como unidades de almacenamiento en los sistemas de energía eléctrica.
- IV. Almacenamiento energético mediante aire comprimido, se comprime aire mediante el consumo de energía eléctrica de la red, almacenándolo en tanques subterráneos, acuíferos o cavidades rocosas.

- V. Almacenamiento eléctrico mediante bombeo en una central hidroeléctrica, consiste en el bombeo de líquido aguas arriba de la central mediante energía eléctrica, de tal forma que dicha agua pueda ser empleada a posteriori para producir energía eléctrica en situaciones punta de demanda.
- VI. Sistemas de almacenamiento eléctrico mediante baterías, consiste principalmente en el almacenamiento de energía mediante reacciones químicas, este método de almacenamiento es el más desarrollado a día de hoy y será desarrollado en profundidad a continuación.

4.2 TECNOLOGÍA DE BATERÍAS

- **Battery Energy Storage System (BESS)**

Los acumuladores reversible electroquímicos también denominados baterías, son dispositivos que almacenan energía mediante su transformación mediante reacciones químicas. El proceso químico mediante el cual se almacena la energía consiste básicamente en la interacción de un polo positivo o cátodo y uno negativo o ánodo, y la sustancia en la cual se encuentran sumergidos ambos polos, un electrolito. El movimiento y la combinación entre los tres elementos anteriormente mencionados, promueve la circulación de corriente continua siempre y cuando los polos de la batería estén conectados a un circuito cerrado. Dicha circulación de corriente se realiza desde cátodo hacia el ánodo cuando la batería se encuentra en proceso de descarga, y desde el ánodo hacia el cátodo cuando se encuentra en proceso de carga.

Actualmente hay numerosos tipos de baterías que emplean reacciones químicas para almacenar energía, dichos tipos se diferencian entre si principalmente por los elementos que reaccionan en el proceso de almacenamiento y por la naturaleza de la reacción química. En el caso de las baterías plomo-ácido, el electrolito reacciona las sustancias químicas localizadas en los polos alterando, por lo tanto, su composición. En otros casos, como sucede con las baterías de iones de litio, la composición del electrolito no presenta cambio alguno en su composición durante la reacción química ya que simplemente transporta los iones entre sendos polos. Existen otros tipos de baterías en las que el

elemento que sufre cambios durante el proceso químico es el electrolito, manteniéndose sendos polos intactos estructuralmente hablando[21].

El tipo de baterías mayormente utilizado actualmente son las de iones de litio, dichas baterías comenzaron a ser utilizadas a nivel mundial gracias a sus altas densidades de energía, una característica que las hace idóneas para ser utilizadas en el mercado de dispositivos portátiles. Sin embargo, actualmente están liderando el proceso de almacenamiento de energía en otros sectores, como puede ser la industria de vehículos eléctricos o en las redes eléctricas a gran escala, donde se denominan BESS. Las BESS, además de aportar las funciones características de cualquier batería de carga y descarga, proveen al sistema con servicios adicionales que mejoran y agilizan el funcionamiento de los sistemas eléctricos, a continuación se describirán los principales componentes de este tipo de baterías.

- ***Componentes de la BESS***

Los sistemas de baterías de almacenamiento energético o battery energy storage systems (BESS) son de carácter modular, es decir, están compuestos por otros elementos además de la batería en sí. Actualmente existen proveedores de baterías que ofrecen dichos componentes de forma conjunta en módulos que se ajustan para proveer la energía o la potencia que requiera el cliente. También existen empresas especializadas en cada uno de los componentes que conforman las BESS, y en consecuencia, existe la opción de obtener un módulo BESS con unas características más personalizadas y con un mayor nivel de especialización. Generalmente la elección de uno u otro método para obtener un módulo BESS depende de la tecnología de baterías a utilizar, las funciones adicionales que la BESS debe llevar a cabo y las características físicas y eléctricas del emplazamiento donde se pretende implantar el sistema.

Los componentes principales que deben formar un sistema BESS son, las baterías, un convertidor DC-AC, un sistema de gestión o battery management system (BSM), un controlador y un sistema de protecciones. Generalmente, dichos módulos de almacenamiento energético van conectados a la red de alta tensión mediante un transformador de potencia. De forma adicional, los BESS podrían requerir sistemas de gestión térmica, filtros de armónicos, cuadros de potencia para gestionar la provisión de

los servicios auxiliares correspondientes y sistemas de comunicación con elementos externos al módulo BESS (SCADA)[21].

A continuación se muestran las dos topologías descritas anteriormente.

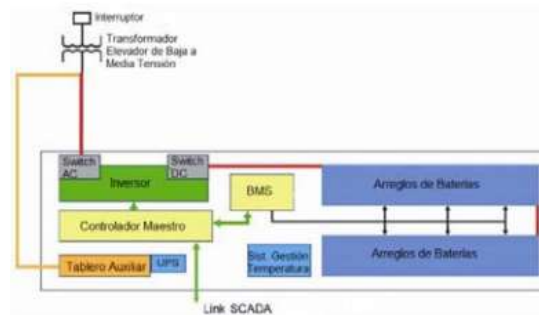


Figura 4-2: Esquema de conexión BESS conjunto

En esta primera figura, todos los elementos, exceptuando el transformador, se encuentran localizados físicamente dentro del módulo de la BESS, dicho transformador se encuentra conectado directamente al transformador de potencia localizado en el exterior del módulo. El controlador principal y el BSM se encuentran en el interior del módulo junto con el convertidor y las baterías, estando estos dos últimos elementos bajo la supervisión del sistema de gestión térmica, necesario para mantener una temperatura bajo la que el rendimiento de dichos elementos sea suficiente[21].

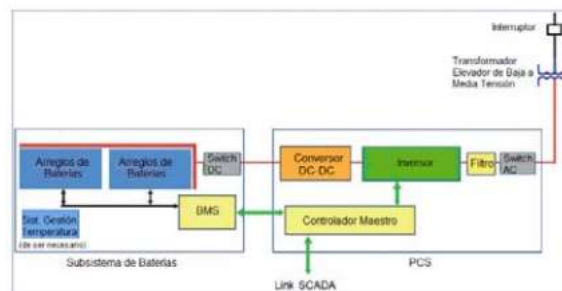


Figura 4-3: Esquema de conexión BESS separados

En este segundo caso, el convertidor de potencia y las baterías se encuentran en contenedores distintos, además, un convertor DC-DC es utilizado para modificar la tensión a la entrada del inversor. Generalmente, este segundo contenedor donde se encuentran los filtros, las protecciones, el controlador principal, además de los elementos mencionados anteriormente se denominan PCS (Power Control System).

A continuación se describen las principales características de los elementos principales que componen la BESS[21].


- **Baterías:** Son el elemento de mayor importancia de las BESS, siendo también el más caro. Físicamente se componen de una serie de celdas que contienen todo el material químico de las baterías, y se encuentran conectadas entre si ya sea de forma paralela o en serie. La forma de conseguir un correcto funcionamiento de la BESS consiste en realizar la conexión en serie para alcanzar la tensión para la que la batería esta diseñada. Dicha tensión óptima depende de la tecnología de batería empleada, normalmente se diseña con la intención de reducir las pérdidas óhmicas y teniendo siempre en cuenta los niveles máximos admisibles.
- **Convertidor:** Se trata de una pieza fundamental cuya función principal consiste en conectar las baterías con la red de tensión eléctrica, la energía acumulada en las baterías es en corriente continua, mientras que la empleada en la red es de corriente alterna, dicho elemento actúa como transformador bidireccional.
- **BMS:** Los *Battery Management System* son equipos electrónicos que realizan funciones de monitorización, evaluación y protección sobre las celdas de baterías, además de mantener continuas comunicaciones con otros elementos de las BESS. Son responsables de mantener parámetros como la temperatura y la tensión bajo límites, además, mediante dichos parámetros estiman otras características como la vida útil o la capacidad de carga/descarga de las baterías.
- **Controlador Principal:** Al igual que todos los elementos anteriormente mencionados, el controlador principal es un elemento fundamental de las BESS. Principalmente tiene funciones de coordinación y comunicación entre varios elementos del módulo BESS, como por ejemplo, enviar señales al inversor para controlar la salida de potencia tanto activa como reactiva.

- ***Diferentes productores de baterías y comparación***

ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN BATERÍAS (BESS)

- **BYD Company:** Fabricante chino de vehículos de transporte tales como automóviles, bicicletas que funcionan a través de baterías recargables, autobuses, carretillas elevadoras, baterías recargables etc. Actualmente BYD Company es el mayor proveedor de baterías recargables del mundo, teniendo la mayor cuota de mercado en el sector de baterías de níquel-cadmio, batería de iones de litio para cargadores y teléfonos móviles en todo el mundo. La cuota de mercado que actualmente posee BYD en cuanto a la venta de baterías para teléfonos móviles es superior al 50%.

Como se puede deducir de lo anteriormente comentado, la compañía BYD se dedica principalmente a la producción y venta de baterías a pequeña escala, sin embargo, también tienen a disposición del cliente una serie de baterías diseñadas para alta tensión. Dicha oferta de baterías junto con sus especificaciones se muestra a continuación.



	Battery-Box H 6.4	Battery-Box H 7.7	Battery-Box H 9.0	Battery-Box H 10.2	Battery-Box H 11.5
	B-Plus H 1.28 (1.28kWh)				
Battery module	5 modules	6 modules	7 modules	8 modules	9 modules
Usable Energy [1]	6.40 kWh	7.68 kWh	8.96 kWh	10.24 kWh	11.52 kWh
Max Output Power	6.40 kW	7.68 kW	8.96 kW	10.24 kW	11.52 kW
Peak Output Power	12.80 kW, 5 mins	15.36 kW, 5 mins	17.92 kW, 5 mins	20.48 kW, 5 mins	23.04 kW, 5 mins
Round-Trip Efficiency	≥95.3 % [1]				
Nominal Voltage	256 V	307 V	358 V	409 V	460 V
Operating Voltage Range	200~282 V	240~338 V	280~395 V	320~451 V	360~500 V
Communication	RS485 / CAN				
Dimensions (W/H/D)	580 x 894 x 380 mm	580 x 1014 x 380 mm	580 x 1134 x 380 mm	580 x 1254 x 380 mm	580 x 1374 x 380 mm
Weight	148 kg	174 kg	200 kg	226 kg	252 kg
Enclosure Protection Rating	IP55				
Warranty	10 years				
Operating temperature [2]	-10 °C to +50°C				
Certification & Safety Standard	UL1642 / TUV(IEC62619) / CE / RCM / UN38.3 / Sicherheitsleitfaden Li-Ionen-Hausspeicher				
Scalability	To be announced				
Compatible Inverters	SMA (5-8 modules) / Kostal / Fronius (coming soon) and more brands to be announced				
Application	ON Grid / ON Grid + Backup (Refer to BYD Minimum Configuration List)				

[1] Test conditions: 100% DOD, 0.2C charge & discharge at +25 °C
[2] -10 °C to 10 °C will be derating

Figura 4-4: Hoja de características BYD Company[22]

ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN BATERÍAS (BESS)

Como se puede observar en la hoja de especificaciones las baterías ofertadas consisten en la agrupación de diferentes módulos, concretamente de 5 a 9 módulos. A pesar de que las baterías ofertadas sean aptas para su uso en alta tensión, los servicios ofrecidos constan únicamente de los módulos de baterías, mientras que para el caso de estudio se requieren todos los componentes necesarios para poner bajo operación un sistema BESS. Dado que esto último es el objetivo del proyecto, se considera más oportuna la utilización de los servicios de un fabricante que oferte un sistema BESS en su totalidad. Además, el fabricante menciona algunas de las aplicaciones de sus baterías en alta tensión, y entre ellas no se encuentra la de almacenamiento de energía a gran escala en alta tensión.

- **Kokam:** A finales de los 90 la compañía Kokam expandió su negocio al diseño y fabricación de baterías de iones de litio, convirtiéndose en una empresa pionera en la comercialización de baterías de litio de alta capacidad de almacenamiento. Actualmente es una filial de SolarEdge, una líder mundial en diversos sectores de la energía que, gracias a sus más de 60 patentes relacionadas con baterías, se ha convertido en el primer fabricante de baterías de iones de litio de alta capacidad. A continuación se muestran las especificaciones de los módulos de baterías ofertados por Kokam.

High Energy Type				
Cooling Type	Natural Air Cooling		Forced Air Cooling	
System Configuration	1 Bank	2 Bank	1 Bank	2 Bank
Bank Configuration	10 Racks (2C5R)	13 Racks (2C5R)	10 Racks (2C5R)	13 Racks (2C5R)
Installed Energy	1,516kWh	3,942kWh	1,516kWh	3,942kWh
Nominal Voltage	736Vdc	736Vdc	736Vdc	736Vdc
Operating Voltage Range	670 – 826Vdc	670 – 826Vdc	670 – 826Vdc	670 – 826Vdc
Max. Charge Power	1,516kW (1P)	3,942kW (1P)	1,516kW (1P)	3,942kW (1P)
Peak Discharge Power	3,032kW (2P)	7,884kW (2P)	4,548kW (3P)	11,826kW (3P)
Max. Discharge Power	1,516kW (1P)	3,942kW (1P)	2,880kW (1.9P)	5,518kW(1.4P)
Round Trip DC Efficiency	>95%			
Operating Temperature	18~ 28°C			
Container Type	20ft	40ft	20ft	40ft
Remark	- System Configuration Incl. 1EA BCP per Bank - Bank Configuration Connection in parallel - Max. Charge Power @ 1 Cycle - Peak Discharge Power @ <10 sec, >SOC 50% - Max. Discharge Power @ 1 Cycle - Round Trip DC Efficiency @ 0.5P, BOL - Operating Temperature Recommended			

ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN BATERÍAS (BESS)

High Power Type				
System Configuration	1 Banks		2 Banks	
Bank Configuration	7 Racks (3C4R)	12 Racks (2C5R)	8 Racks (3C4R)	13 Racks (2C5R)
Installed Energy	1,051kWh	1,501kWh	2,402kWh	3,253kWh
Nominal Voltage	883Vdc	736Vdc	883Vdc	736Vdc
Operating Voltage Range	792 – 991Vdc	660 – 826Vdc	792 – 991Vdc	660 – 826Vdc
Max. Charge Power	3,047kW (2.9P)	2,852kW (1.9P)	6,966kW (2.9P)	5,855kW (1.8P)
Peak Discharge Power	6,306kW (6P)	5,855kW (3.9P)	13,933kW (5.8P)	11,711kW (3.6P)
Max. Discharge Power	3,047kW (2.9P)	2,852kW (1.9P)	6,966kW (2.9P)	5,855kW (1.8P)
Round Trip DC Efficiency	>95%			
Operating Temperature	18– 28°C			
Container Type	20ft		40ft	
Remark	<ul style="list-style-type: none"> - System Configuration Incl. 1EA BCP per Bank - Bank Configuration Connection in parallel - Max. Charge Power 1 Cycle - Peak Discharge Power @ <10 sec, >SOC 50% - Max. Discharge Power 1 Cycle - Round Trip DC Efficiency @ 1.0P, BOL - Operating Temperature Recommended 			


Figura 4-5: Hoja de características Kokam[23]

La principal diferencia de este proveedor de baterías con los hasta ahora estudiados, es el hecho de que ofertan módulos de baterías BESS en su totalidad, es decir, el sistema de baterías, el sistema de conversión de potencia, el software de gestión de la energía y el transformador de potencia. En definitiva, el proveedor Kokam consiste en una opción muy interesante considerando que oferta el módulo de la BESS al completo, tiene una gran variedad de productos en su oferta y es un conocido proveedor con una trayectoria profesional de prestigio a nivel internacional.

- **LG Chem:** Es la compañía de Corea del Sur más grande del sector, comenzó la producción de baterías a gran escala en 1999, lo que le llevo a ser el tercer productor de baterías ion-litio del mundo a partir de 2011. Destaca su especialización en baterías para vehículos eléctricos, sin embargo también ofrecen módulos de baterías BESS con capacidad para operar a nivel de red. A continuación se describen las características de los módulos ofertados.

Long-duration application
with continuous power supply (≥ 4 hours)

ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN BATERÍAS (BESS)

Energy Container	Models	40ft HC ISO Container	
		M48145P5B	M48218P5B
		Manned	Unmanned
	Energy [MWh]	5.4	6.8
	System Voltage [V dc]	714-1,000	
	Dimension [W x H x D, m]	12.2 x 2.9 x 2.5	
	Weight [ton] (incl. battery)	50	60
	Ambient Temperature [°C]	-20-50	
	Communication	CAN2.0B, Modbus TCP/IP	

(Container system design can be changed according to customer requirements)

Long-duration application
with continuous power supply (≥ 2 hours)

Long-duration application
with continuous power supply (≥ 1 hour)

Models	40ft HC ISO Container		40ft HC ISO Container	
	M48134P8B	M48200P8B	M48126P3B	M48189P3B
	Manned	Unmanned	Manned	Unmanned
Energy [MWh]	5.1	6.3	4.8	6.0
System Voltage [V dc]	714-1,000		714-1,000	
Dimension [W x H x D, m]	12.2 x 2.9 x 2.5		12.2 x 2.9 x 2.5	
Weight [ton] (incl. battery)	50	60	50	60
Ambient Temperature [°C]	-20-50		-20-50	
Communication	CAN2.0B, Modbus TCP/IP		CAN2.0B, Modbus TCP/IP	

(Container system design can be changed according to customer requirements)

Figura 4-6: Hoja de características LG Chem[24]

El proveedor LG Chem, al igual que sucedía con Kokam, oferta contenedores de baterías BESS en su totalidad. Si bien es cierto que la oferta de contenedores no es tan alta como la que se puede observar en otros proveedores, la empresa ofrece suficientes módulos adaptables a las necesidades requeridas para cada caso, en definitiva, LG Chem consiste en una opción a tener en cuenta durante selección del módulo BESS para el proyecto.

- **NGK Insulators:** Es una empresa japonesa cuya actividad principal se basa en la producción de materiales cerámicos de carácter aislante. Sin embargo, la firma japonesa es conocida mundialmente por el desarrollo de baterías de Sulfuro de Sodio. A pesar de que este tipo de baterías no es el comúnmente utilizado en el sector eléctrico, si que poseen una gran relevancia en el almacenamiento de energía eléctrica, especialmente junto a fuentes de energía renovables como la eólica y solar.

ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN BATERÍAS (BESS)

Rated Output ⁽¹⁾ [kW]	200	400	600	800	
Energy Capacity ⁽¹⁾ [kWh]	1,200	2,400	3,600	4,800	
Weight ⁽²⁾ [t]	21	42	63	84	
Numbers of Containerized NAS Batteries Connected in Series	1	2	3	4	
DC Nominal Voltage [V]	192	384	576	768	
Footprint ⁽³⁾	Width X Depth Area	6.1 X 2.4 [m] 15 [m ²]	6.1 X 2.4 [m] 15 [m ²]	6.1 X 5.6 [m] 34 [m ²]	6.1 X 5.6 [m] 34 [m ²]
	Assumed Arrangement				

(1) AC output base. PCS conversion efficiencies from AC to DC and vice versa are assumed to be 96%.
(2) Weight of battery unit alone.
(3) PCS and maintenance spaces are excluded. Containers are assumed to be stacked in two steps.

Figura 4-7: Hoja de características NGK Insulators[25]

La cantidad de contenedores ofertados por es limitada con respecto a otros proveedores, sin embargo las características técnicas que oferta la firma se ajustan a los órdenes de magnitud que se buscan, además, cabe comentar que los contenedores que ofertan tienen la configuración BESS que se requiere. El hecho de que las baterías sean de Sulfuro de Sodio podría conllevar algún contratiempo en proceso de reparación o mantenimiento dada predominancia de las baterías ion litio.

- **Samsung SDI Co:** El gigante tecnológico tiene sus orígenes en los 70 con la producción de válvulas de vacío y pantallas de rayos catódicos de alta tecnología. Actualmente la firma ha desplazado su foco de producción al campo de las baterías de iones de litio y productos electrónicos. Sin embargo, esto no le ha impedido llevar a cabo una expansión relevante en el negocio de energías, con especial atención en el sector del almacenamiento energético. A continuación se muestra la hoja de características que oferta Samsung en relación a sus baterías aptas para el su uso a nivel de red.

Energy Platform New

Over 2 hours

- Energy density has increased more than 16% with upgrades to Samsung SDI's new advanced module
- Higher density enables better footprint and installation cost savings



Item	Module	Rack			
		E3-M088	E3-R168	E3-R203	E3-R221
Model		E3-M088	E3-R168	E3-R203	E3-R221
Cell Capacity	Ah	100	100	100	100
Energy	kWh	8.8	168	203	221
Operating Voltage	V	38.4-49.8	730-946	883-1,145	960-1,245
Dimension (W x D x H)	mm	370 x 637 x 160	876 x 711 x 1,791	876 x 711 x 2,123	876 x 711 x 2,289
Weight	kg	61	1,268	1,523	1,650

ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN BATERÍAS (BESS)

Figura 4-8: Hoja de características Samsung SDI Co[26]

Samsung tiene una mayor oferta de baterías que la presentada anteriormente, sin embargo se considera que esta es la que se sitúa con mayores opciones de ser empleada en el proyecto dadas sus características técnicas. A priori se considera que las baterías ofertadas por Samsung no se ajustan tanto a los requerimientos del proyecto como las de otros productores, además, la oferta de Samsung no lleva el módulo de la BESS al completo, sino que solo contiene las baterías.

- **Hyosung:** Es una firma presente en diferentes sectores tales como el textil, sistemas eléctricos y de industria, materiales industriales, químicos, información y comunicaciones. Dentro de la parte eléctrica la firma presenta una especialización en sistemas de almacenamiento eléctrico, a continuación se muestran las especificaciones técnicas.

Technical Data		HS-E110G	HS-E250G	HS-E500GL	HS-E1000GL	HS-E2000GL
Input Side(DC)	Voltage Range	550~850V	550~850V	550~850V	750~1,050V	750~1,050V
	Max. Input Current	218A	500A	1,000A	1,333A	2,667A
Output Side(AC)	Rated Power	110kW	250kW	500kW	1,000kW	2,000kW
	Output Voltage	3Ø, 380V	3Ø, 380V	3Ø, 340V	3Ø, 440V	3Ø, 440V
	Output Current	167A	380A	849A	1,312A	2,625A
	Grid Frequency	50/60Hz	50/60Hz	60Hz	60Hz	60Hz
	THD	<5%	<5%	<5%	<5%	<5%
	Power Factor	>0.99	>0.99	>0.99	>0.99	>0.99
Efficiency	Max. Efficiency	>97%	>97%	>97%	>97%	>97%
Environmental	Grid Tied Transformer	O	O	X	X	X
	Cooling	Forced Air	Forced Air	Forced Air	Forced Air	Forced Air
	Ambient Temperature	-20~50°C	-20~50°C	-20~50°C	-20~40°C	-20~40°C
	Relative humidity	<95%RH	<95%RH	<95%RH	<95%RH	<95%RH
Mechanical Spec.	Protection Class	IP20	IP20	IP20	IP20	IP20
	Dimensions (W/D/H)[mm]	1200*850*2120	2400*850*2120	2200*990*2200	4000*750*2220	5500*1100*2200
	Weight	1,070kg	2,400kg	1,930kg	2,930kg	5,000kg
Communication	Comm. Port	CAN2.0, RS422	CAN2.0, RS422	CAN2.0, RS422	CAN2.0, RS422	CAN2.0, RS422

Figura 4-9: Hoja de características Hyosung[27]

La oferta de módulos BESS proporcionada por Hyosung se considera de interés dado que los requerimientos técnicos se asemejan a los necesarios para el proyecto en cuestión, además, la oferta lleva incluida el módulo BESS en su totalidad, es decir todos los componentes necesarios para enlazar y controlar el sistema de almacenamiento al gusto del generador.

- **Tesla y Panasonic:** Estos dos fabricantes de baterías se consideran grandes participantes en el mercado de las baterías ion litio, sin embargo no poseen una oferta competitiva para el almacenamiento energético a gran escala mediante la implementación de un módulo BESS. En consecuencia, se han decidido descartar para la elección de los contenedores BESS que se implementaran en el proyecto.

4.3 APLICACIONES

Los sistemas de almacenamiento energético tienen la función básica y principal de almacenar energía, dicha labor puede tener distintos impactos en el sistema en función de cómo se lleve a cabo. En consecuencia, existen diferentes aplicaciones de los sistemas de almacenamiento energético, todos ellos diferenciados entre sí por el impacto que causan en el sistema, dado que el proceso físico que se lleva a cabo es siempre el mismo. Dependiendo de los elementos del sistema eléctrico con los que interactúen las baterías, las aplicaciones en cuestión pueden clasificarse. En este caso los grupos de clasificación principales son, renovables, servicios de red, consumidores y micro redes[25].

- **Estabilización de renovables:** Debido a los perfiles variables y de poca predictibilidad que definen a las renovables, en muchos casos el sistema se encuentra en escenarios ya sea de sobre producción o escasez energética. En este contexto se encuentra una de las aplicaciones predominantes de los sistemas de almacenamiento eléctrico, que básicamente consiste en almacenar la energía sobrante de los picos de generación eléctrica, donde la producción supera a la demanda. De esta forma, en situaciones contrarias, es decir, en aquellos momentos donde la demanda sea mayor que la generación, se podrá emplear la energía almacenada previamente con el fin de operar lo más cerca del punto óptimo de funcionamiento. A continuación se muestra una imagen aclarativa del proceso previamente explicado.

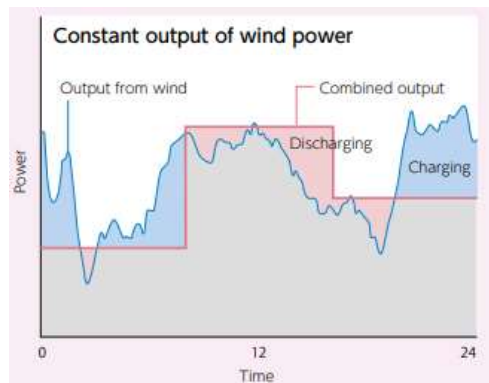


Figura 4-10: Proceso estabilización de renovables[27]

- **Sustitución de centrales eléctricas de combustibles fósiles:** Las baterías actuales presentan la habilidad de proveer servicios de capacidad a los operadores del sistema, gracias a los grandes avances en este campo, existe la posibilidad de controlar con gran exactitud las inyecciones energéticas al sistema mediante los sistemas de almacenamiento. Esta aplicación se presenta como una oportunidad para desechar o disminuir la implicación de las plantas de combustibles fósiles en este tipo de mecanismos de mercado. Además de la participación en los mecanismos de mercado de capacidad, que son generalmente aquellos con mayor liquidez, existen muchos otros casos dónde los sistemas de almacenamiento podrían ser sustitutivos de las plantas de combustibles fósiles, tales como en la compra/venta de energía aprovechando las variaciones en el mercado, regulación de frecuencia, servicios de rampa, control de tensión y otras funciones de red.
- **Servicios auxiliares:** Como se ha descrito anteriormente, las baterías pueden participar en diferentes mecanismos de mercado, lo cual implica una ganancia mayor que el hecho de reducir el uso de plantas de combustibles fósiles. Dichos mecanismos de mercado generalmente están remunerados, lo cual supone una fuente de ingresos significativa que resulta necesaria en muchos casos para recuperar los costes de inversión. Uno de los mecanismos de mercado más convenientes para los sistemas de almacenamiento, además del de capacidad, ya mencionado anteriormente, es el de regulación de frecuencia. Dicho servicio consiste en la producción o consumo de energía activa de forma instantánea con

ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN BATERÍAS (BESS)

el fin de equilibrar la generación con la demanda en tiempo real, tal y como se muestra a continuación.

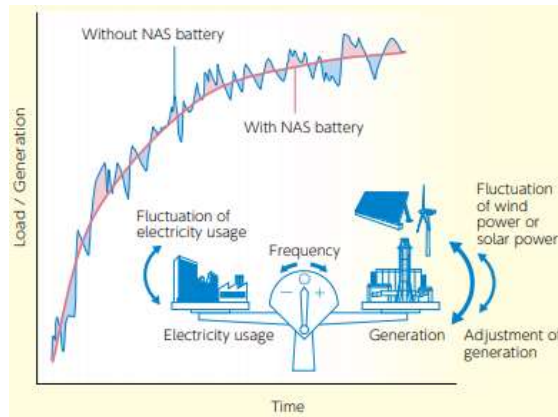


Figura 4-11: Funcionamiento servicios auxiliares[25]

- **Aplazamiento de inversiones:** Otra aplicación de gran relevancia consiste en el aplazamiento o disminución de inversiones en equipos de red. Dicha aplicación tiene la condición de que los sistemas de almacenamiento deben de estar cerca del punto de consumo de la energía. Básicamente consiste en el almacenamiento de energía en momentos de descongestión del sistema, para que en otros escenarios dónde el sistema esté congestionado, y por lo tanto no pueda llegar suficiente energía al punto de consumo, el sistema de almacenamiento pueda proveer la energía faltante, permitiendo así un correcto funcionamiento del sistema. De esta forma podrían evitarse inversiones parcialmente ineficientes en transformadores, subestaciones, líneas eléctricas etc. A continuación se muestra, de forma más visual, cual es el proceso llevado a cabo.

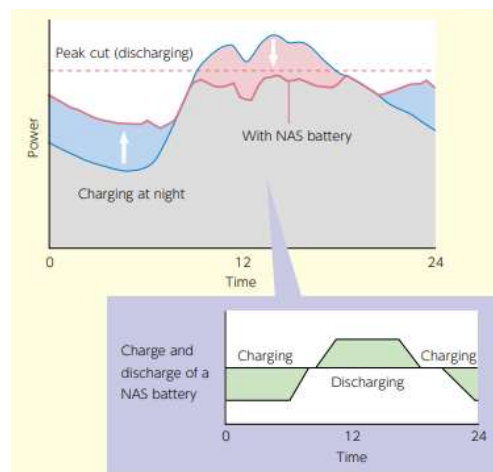


Figura 4-12: Proceso de descongestión de red mediante baterías[25]

- **Potencia de respaldo:** Los módulos de baterías BESS tienen una función importante como elementos de respaldo en caso de fallos del sistema que impidan el flujo de electricidad por zonas críticas del sistema. Gracias a la considerable capacidad de almacenamiento que poseen las baterías, sumada a su habilidad para proveer dicha electricidad de forma continua durante unas horas, convierte a los sistemas de almacenamiento de energía en perfectos candidatos para proveer energía a elementos de urgencia cuando el sistema eléctrico se encuentre en estado crítico y por lo tanto incapacitado para proveer dicha energía. De una forma simple podría decirse que pueden actuar como elementos de último recurso en la producción de energía eléctrica.
- **Almacenamiento de energía solar local:** Debido al impacto que está causando la reducción exponencial de los costes en instalaciones solares, actualmente se considera que la combinación de los sistemas de almacenamiento BESS con las instalaciones solares son una sinergia muy fructífera. Podría decirse que durante la combinación conjunta de ambos elementos muchas de las aplicaciones mencionadas anteriormente se ven reflejadas durante el funcionamiento de ambos sistemas. En dichos casos los sistemas de almacenamiento podrían reducir o eliminar gran parte del uso de la red de transmisión cuando la instalación solar se encuentra en su momento pico de producción. También podrían ahorrar costes significativos a los consumidores mediante la reducción de costes de red, almacenamiento de energía solar, almacenamiento de energía en puntos pico de producción y disminución de la carga total de demanda.
- **Suministro de energía solar 24/7 en micro redes:** Entendiéndose por micro red, una zona del sistema eléctrico con un grado relevante de aislamiento en cuanto a interconexiones con otras zonas del sistema, se procede con la siguiente explicación de la aplicación en cuestión. En días de altos niveles de irradiación la producción solar alcanza de cuatro a cinco veces el nivel de demanda instantáneo, sin la ausencia de baterías, la energía restante producida por la instalación solar sería desechada, mientras que si hubiese suficiente capacidad de almacenamiento, dicha energía podría ser racionada y empleada en momento valle de producción solar, durante la noche principalmente. Para que dicho método surta efecto, las baterías en cuestión deben tener

ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN BATERÍAS (BESS)

una capacidad de descarga que se prolongue lo suficiente a lo largo del tiempo, de tal forma que la demanda a lo largo del día pueda ser cubierta por la energía almacenada proveniente de la producción solar. De forma aproximada, la capacidad de almacenamiento debe ser $2/3$ de la capacidad de la instalación solar.

Chapter 5. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

5.1 PLANTA SOLAR

- Descripción general: La instalación de generación estudiada en el presente proyecto es de carácter solar fotovoltaica, es decir, produce energía a través de la irradiación solar que reciben las células fotovoltaicas de los paneles. La capacidad aproximada que el fabricante prevé que vaya a poder proporcionar la instalación fotovoltaica es de 237 MWdc, que considerando un ratio de conversión típico DC/AC de 1,3, suponen unos 182 MWac, aunque los módulos solares todavía no se encuentran definidos y por lo tanto dicho número podría variar. Además, la instalación pretende incorporar un sistema de almacenamiento in situ que actúe como elemento de soporte y ayuda al proceso de generación energética. La capacidad estimada para el sistema BESS ronda los 90 MW por 4 horas como periodo de carga, pero como sucede con la capacidad fotovoltaica dependerá de los módulos de almacenamiento que se escojan finalmente.

Otros componentes de la instalación que requieren mención, pero que luego serán analizados con más detenimiento, son, la subestación asociada a la instalación de generación, la línea de transporte que conecta dicha subestación con la planta de producción, el centro de control del sistema en su totalidad y la planta de producción fotovoltaica[28].

Por último, concretar que el emplazamiento de la instalación de generación se localiza cerca de Boulder City, Nevada, una población localizada en el sur del estado de Nevada. Imágenes aclarativas sobre la localización exacta del emplazamiento serán adjuntadas con posterioridad en los siguientes apartados.

- Subestación: Al considerarse la planta de generación de un tamaño considerable, es necesario el establecimiento de un punto específico de conexión a red que asegure el cumplimiento de todos los códigos de red. En este caso se distinguen dos subestaciones eléctricas relevantes, en primer lugar, la “mead substation” que actúa como enlace eléctrico tanto con Boulder City como con la subestación asociada a la planta de

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

generación fotovoltaica. Dicha subestación no es objeto de estudio de este proyecto a ningún nivel.

En segundo lugar, se observa la “Townsite substation”, siendo dicha subestación la que actúa como punto de conexión de la instalación de generación con el sistema eléctrico de Nevada. La “Townsite substation” es de uno exclusivo para la transformación de potencia proveniente de la planta de generación fotovoltaica, siendo dicho cambio en la tensión llevado a cabo por un transformador con tres bobinas cuyos ratios de transformación son los siguientes, 230/13,8/34,5 kV y 126/168/210 MVA, mientras que la estructura de conexión es estrella, triángulo, estrella[28]. A continuación se muestran las especificaciones completas del transformador de la subestación asociada a la planta de generación junto con la localización geográfica de la subestación.

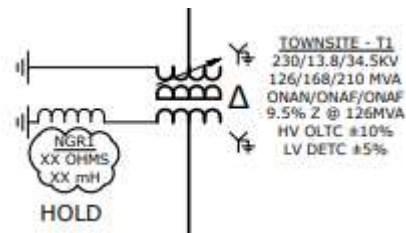


Figura 5-1: Especificaciones de trafa subestación

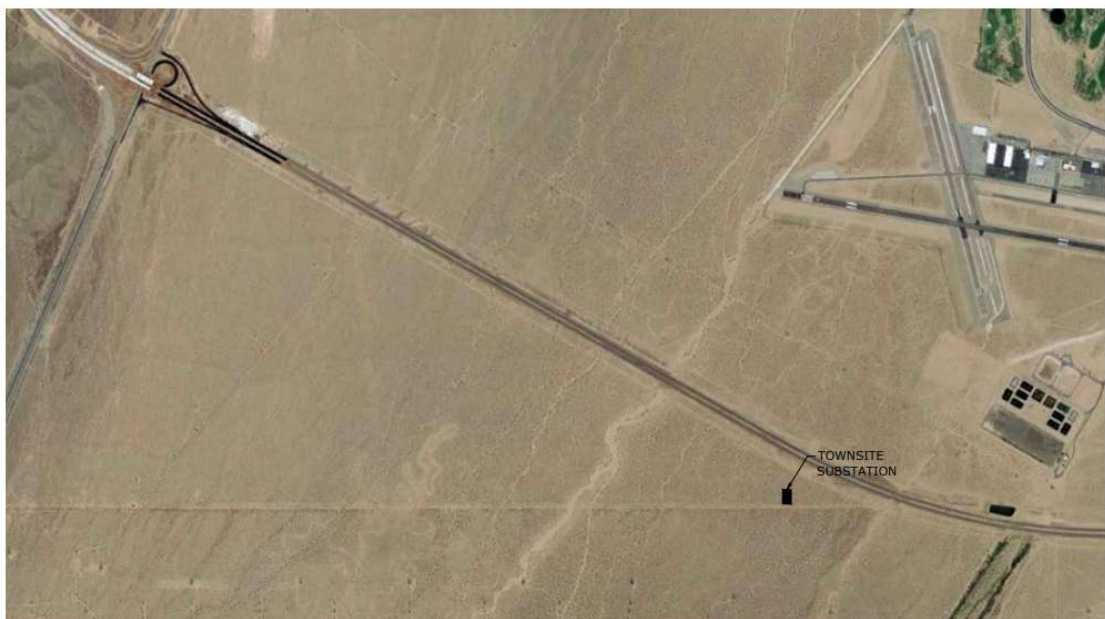


Figura 5-2: Imagen satelital de subestación

Observándose en la parte superior derecha de la imagen el aeropuerto y el inicio de la población de Boulder City.

- Línea de transporte: La línea de transporte en cuestión consiste en la línea eléctrica encargada de conectar la nueva “Townsite substation” con la “Mead substation”, con el fin de normalizar el flujo eléctrico entre la planta de generación fotovoltaica y la red del sistema eléctrico de Nevada. La línea de transporte es de carácter aéreo y con una tensión nominal de 230 kV, ajustándose a los ratios de transformación de sendos transformadores[28]. La línea de transporte estará compuesta por tres sets distintos de conductores dependiendo de los requerimientos de la línea en cada momento, siendo el set de conductores el mostrado a continuación.

CONDUCTOR DATA

RULING SPAN = 635 FT	COND. SET 1	COND. SET 2	COND. SET 3
PARAMETERS	AFL OPGW DNO-8071 S1-91/61/668	795 KCMIL ACSR "DRAKE"	7#8 Alumoweld
NUMBER OF CONDUCTORS PER PHASE	1	1	1
STRANDING	-	26/7	7 Strands Alumoweld
BARE WEIGHT OF CONDUCTOR	0.478 LB/FT	1.094 LB/FT	0.2618 LB/FT
CONDUCTOR DIAMETER	0.668 IN	1.108 IN	0.385 IN
MAXIMUM WORKING TENSION	23302 LBS	31500 LBS	15930 LBS

Figura 5-3: Especificaciones de conductores de línea de transporte

La línea de transporte conecta sendas subestaciones localizándose ambas al sur de Boulder City, lo cuál facilita el trazado de la trayectoria a seguir del vano, debido principalmente a que no tendrán la necesidad de cruzar por ningún núcleo urbano. La línea eléctrica tiene una longitud aproximada de tres millas, estando obligada a atravesar por encima o de forma cercana 15 líneas de 230 kV o 500 kV, lo cual es un factor importante a la hora de diseñar tanto el trazado como la altitud del vano, así como su conductor y las protecciones pertinentes. A continuación se muestra de forma geográfica la localización y trazado de la línea de transporte entre ambas subestaciones.



Figura 5-4: Imagen satelital de línea de transporte

- Centro de control: Se considera un punto esencial y fundamental para la correcta explotación de sistemas eléctricos, generalmente los centros de control tienen la función de mantener la seguridad y la calidad de la energía destinada a los consumidores. El centro de control se caracteriza por una serie de funciones básicas, en primer lugar, tiene la obligación de establecer un sistema de protecciones que asegure el correcto funcionamiento de todos los elementos dependientes del centro de control a todos los niveles. En segundo lugar, en función de si los elementos dependientes del centro de control pertenecen a la red de alta, media o baja tensión, se suelen exigir una serie de funciones u otras. Las funciones que de forma general se han de llevar a cabo independientemente de la tensión son, operación de la red, que principalmente implica la supervisión de la red para asegurar su correcto funcionamiento y en algunos casos implica la programación y ejecución nuevas configuraciones o consignas de explotación. La coordinación y gestión de trabajos o proyectos que se estén llevando a cabo y que requieran paradas de mantenimiento o instalación de nuevos elementos en la red. Otra función de gran importancia es la de detectar y solucionar incidencias que se puedan dar

en los diferentes elementos bajo la operación del centro de control. Por último, los centros de control están provistos de un sistema de comunicaciones de gran capacidad para que puedan recoger, almacenar y procesar toda la información proveniente de la multitud de sistemas de emisión situados en toda la red[28]. A continuación se muestra un plano en planta del sistema de control localizado en la subestación asociada a la planta de generación fotovoltaica.

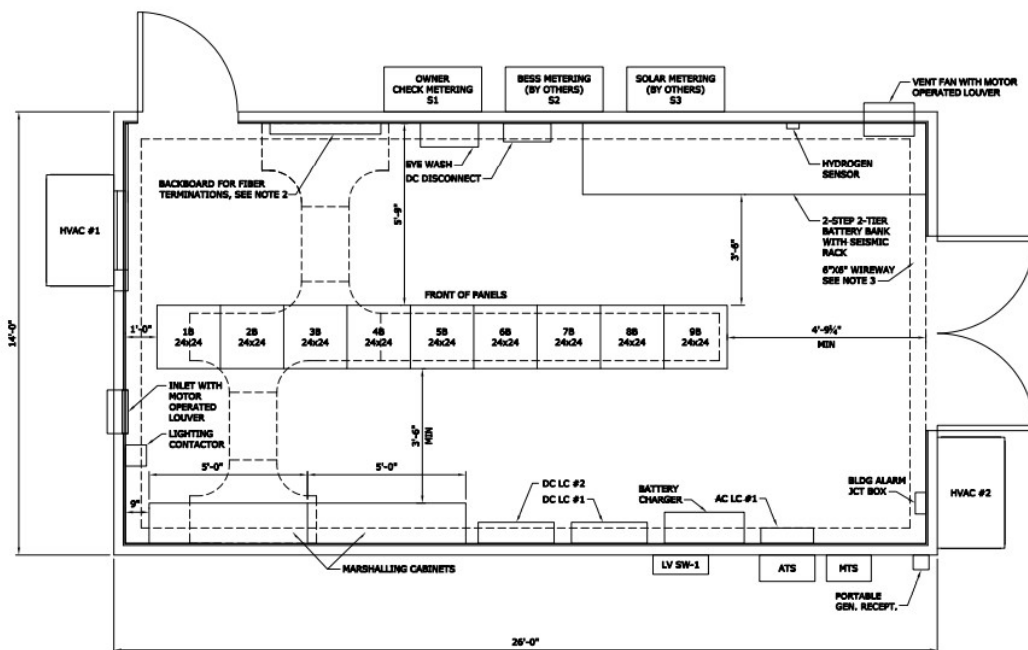


Figura 5-5: Plano del centro de control

- **Planta solar:** La instalación de generación fotovoltaica representa uno de los elementos del sistema de mayor relevancia, como se ha descrito anteriormente la planta solar presenta una capacidad de 237 MW dc, que asumiendo un ratio DC/AC de 1,3, se calcula una capacidad de 182 MW ac. Tal y como se muestra a continuación, la planta fotovoltaica está provista de las protecciones necesarias entre el punto de transformación y las acometidas conectadas a los módulos fotovoltaicos y de almacenamiento. La planta tiene un total de 8 acometidas para los módulos fotovoltaicos, siendo de misma tensión pero distinta intensidad y por lo tanto distinta potencia. Según los cálculos realizados, se estima que en las 8 acometidas la capacidad empleada rondar los 22,5 MW ac, un valor por debajo del límite marcado por las protecciones de 35 MW ac, si bien es cierto en dos

de las acometidas se emplea un doble circuito por lo que acumula un total de 45 MW por cada acometida[28]. A continuación se muestra el plano eléctrico que describe la topología de la planta fotovoltaica junto al sistema de almacenamiento.

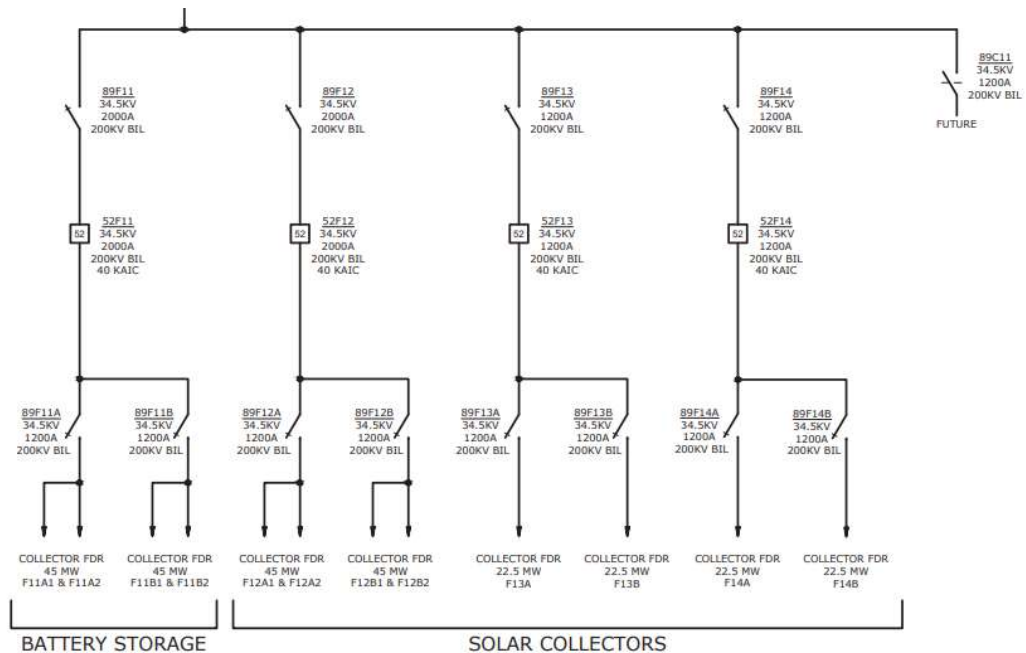


Figura 5-6: Unifilar planta solar + sistema de almacenamiento

5.2 BESS

El objetivo principal de este apartado del proyecto consiste en elegir una de las baterías ofrecidas por los distintos fabricantes mencionados anteriormente, de tal forma que se adapte a los requerimientos técnicos del sistema de almacenamiento de la planta y a la vez sea la más competitiva o adaptable al caso que se presenta.

Tal y como se ha descrito previamente la información técnica que se dispone sobre el sistema de almacenamiento, además de la que se provee mediante los planos mostrados anteriormente, consiste en que el sistema de almacenamiento tiene una capacidad de 90 MW x 4h, lo cuál equivale a un total energético de 360 MWh. Como se puede observar en el unifilar adjuntado anteriormente, las líneas de tensión a las cuales se conectarán los sistemas de almacenamiento se encuentran a una tensión nominal de 34,5 kV, mientras que la

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

capacidad estimada para las cuatro acometidas empleadas en el sistema de almacenamiento es de 22,5 MW cada una. Siendo estas las principales características técnicas de planta respecto a los sistemas de almacenamiento, se deberá proceder a seleccionar un fabricante que se adecue a los mencionados requerimientos técnicos. Dado que los contenedores de baterías tienen una capacidad total de en el mejor de los casos 2 MW, se deberá establecer una conexión en serie que mediante superposición alcance la capacidad establecida para cada acometida.

Después de comparar varios de los fabricantes descritos y analizados anteriormente se ha llegado a la conclusión de que el fabricante Hyosung tiene una oferta de contenedores de baterías que se ajusta a los requerimientos de la planta[27].

En primer lugar, Hyosung es un fabricante con muchos años de experiencia en la instalación de sistemas de almacenamiento por todo el mundo, aunque con principal foco en Norte América, es por ello que gran parte de su oferta tiene como frecuencia de operación 60 Hz. Dicho valor de frecuencia se ajusta a los requerimientos de la planta dado que esta se sitúa en el estado de Nevada, USA.

En segundo lugar, el fabricante oferta unos módulos de baterías de alta capacidad, preparados para su uso en instalaciones de alta tensión, lo cual los hace idóneos para el proyecto en cuestión. Hyosung oferta contenedores de almacenamiento desde 110 kW hasta 2 MW de potencia, siendo la última la opción escogida considerando el hecho de que la capacidad de la instalación reservada para el sistema de almacenamiento es de un total de 90 MW. Dada la elevada cantidad de potencia de almacenamiento, se han escogido los contenedores con mayor potencia con el fin de optimizar el espacio disponible en la instalación fotovoltaica.

En tercer lugar, el fabricante en cuestión oferta módulos de almacenamiento tipo BESS, es decir, no solo vende el módulo de baterías como tal, sino que dicho módulo viene acompañado de todos los elementos que definen una BESS. Los contenedores están configurados con un PCS, las baterías, HVAC, convertidor DC, módulo de monitorización, un sistema de protección contra incendios y un transformador para disminuir la tensión de

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

red. El fabricante ofrece servicio de transporte desde el punto de producción hasta la instalación de generación siempre y cuando el cliente así lo desee. Además, dada la importancia de elementos como el sistema de refrigeración o el sistema contra incendios para el correcto funcionamiento de las baterías, el fabricante asegura unos ciertos estándares en lo que a estos elementos se refiere. A continuación se muestra la distribución de los contenedores ofrecidos por Hyosung.

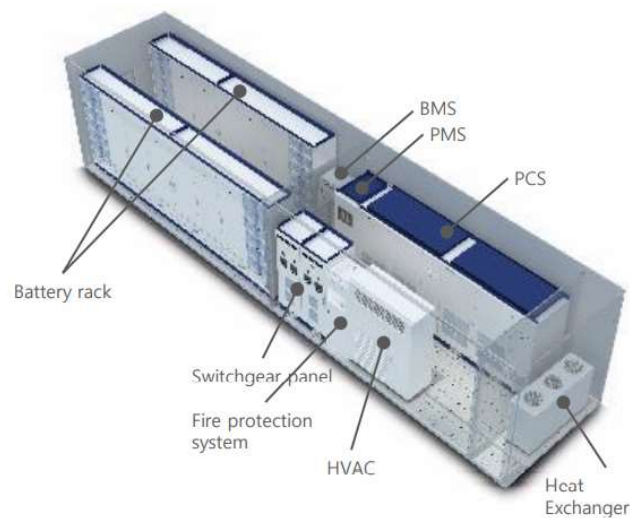


Figura 5-7: Esquema contenedor Hyosung[27].

En cuarto lugar, los requerimientos que estipula el fabricante que se han de cumplir se ajustan al proyecto tanto geográfica como eléctricamente. Tanto los niveles de tensión como los de intensidad son fácilmente accesibles mediante la instalación de un transformador que se adecue a los 34 kV de alta tensión, también será necesario la selección específica de un convertidor que asegure los niveles de tensión requeridos por el fabricante, como se ha mencionado anteriormente. Otros requerimientos de carácter medioambiental o geográfico como el rango de temperatura o la humedad relativa también son satisfechos por la localización de la instalación, el rango de temperatura recomendado por el fabricante es entre 20° - 40°, estando la temperatura media de Boulder City en ese rango de valores durante la mayoría de los meses del año, por otro lado, la humedad relativa de la ciudad se encuentra de forma media, muy por debajo de 95% que requiere el fabricante.

Teniendo en cuenta que la capacidad total reservada para el sistema de almacenamiento es de 90 MW, habiendo cuatro acometidas para dicha capacidad, lo cuál indica una capacidad por acometida de 22,5 MW, como ya se ha comentado anteriormente, el número de módulos necesarios se especifica a continuación. Siendo las baterías de 2 MW, serían necesarias 11,25 contenedores de baterías, dado que generalmente es recomendable sobredimensionar la instalación antes que hacer lo contrario, con el fin de no perder el coste de oportunidad que podrían proveer la venta de energía bajo ciertas circunstancias. En definitiva, se necesitarían 12 contenedores de baterías por acometida, lo cual hace un total de 48 contenedores. Siendo las dimensiones de los contenedores en milímetros 5500/1100/2200 (W/D/H), se calcula un total de 290,4 m² de superficie, y un volumen total de 638,88 m³.

5.3 INTEGRACIÓN DE BESS EN LA CENTRAL

Este apartado pretende ilustrar cuales son los elementos principales y fundamentales para llevar a cabo, de forma satisfactoria, la integración de un sistema BESS en una instalación de generación fotovoltaica. Una parte de la sección estará dedicada a la descripción de las diferentes configuraciones empleables en este tipo de casos de integración, mientras que habrá otra sección dedicada a la explicación de las principales estrategias de control empleadas para obtener el mayor beneficio posible de la sinergia entre la planta de generación solar y el sistema de almacenamiento.

Generalmente este tipo de sistemas disponen de numerosos dispositivos capaces de monitorizar la situación en tiempo real, siendo así capaces de reaccionar de forma instantánea ante cualquier perturbación o cambio sustancial en el sistema eléctrico que implique variaciones en la planta de generación en cuestión. Sistemas de medición inteligentes son necesarios para medir todos los datos de carga y transmitirlos al operador de red mediante el sistema de supervisión de control y adquisición de datos (SCADA). También es necesario un canal de comunicaciones bidireccional que permita al operador del sistema enviar señales y datos a la planta de generación fotovoltaica. A continuación se muestra un esquema combinatorio de los sistemas de comunicación y de control junto a un plano unifilar de la planta[29].

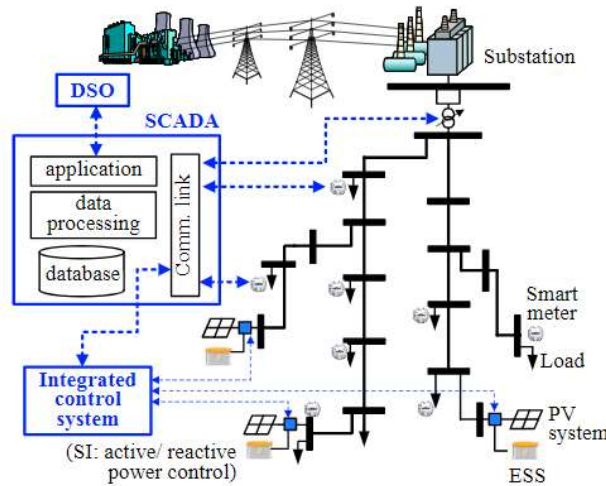


Figura 5-8: Esquema de la integración BESS en el sistema

En cuanto a las configuraciones de acoplamiento empleadas para sincronizar el sistema BESS con la planta de generación fotovoltaica, destacan tres topologías principales. Dichas configuraciones, también denominadas estructuras PCS, se refieren a un único módulo de PV/Baterías que suelen involucrar a su vez a convertidores de potencia y una parte del transformador de potencia. Las tres topologías estudiadas se describen a continuación.

- **Acoplamiento AC:** Esta configuración se caracteriza por emplear dos inversores distintos para conectar la planta PV con el módulo BESS. Ambos inversores se encuentran conectados al punto de conexión a red (PCC) empleando transformadores de dos bobinas por fase. El inversor del sistema fotovoltaico tiene cierta preferencia sobre el control de la planta y direcciona la electricidad de forma unidireccional hacia la parte alterna del sistema. Por otro lado, el convertidor BESS controla los flujos de potencia provenientes del sistema de almacenamiento, ya sea en el inversor o en el rectificador. Cabe destacar que, debido a la utilización de dos sistemas de inversores separados, esta configuración permite tanto un sistema BESS distribuido, que puede utilizarse para la configuración modular de toda la planta, permitiendo también un sistema concentrado en el que la potencia total del BESS se transmite en un único punto, que puede incluso estar alejado de la planta fotovoltaica[30].

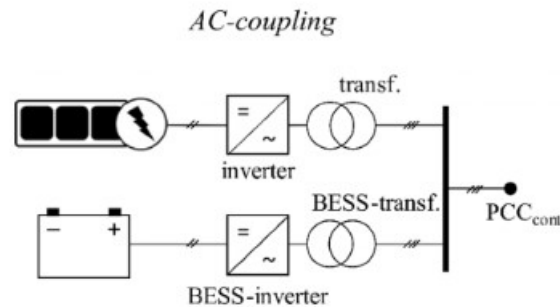


Figura 5-9: Configuración AC-Coupling

- Acoplamiento DC / BESS:** Dicho acoplamiento se basa en la conexión del convertidor dc-dc con el módulo de baterías, tal y como se muestra más adelante. La configuración principalmente se basa en la conexión del módulo de baterías al nudo de corriente continua mediante el convertidor dc-dc. Por otro lado, el inversor controla la potencia redirigida al convertidor conectado al punto de conexión a red (PCC), regulando así la corriente desde el nudo de corriente continua. El convertidor dc-dc regula la tensión en el nudo de corriente continua, afectando directamente sobre las condiciones de operación de la planta fotovoltaica, en consecuencia, la conexión deberá ser de carácter bidireccional entre las BESS y el PCC. Esta configuración solo es apta para los sistemas de almacenamiento distribuidos debido a que el módulo BESS debe estar conectado al lado de corriente continua en cada inversor[30]. A continuación se muestra la configuración descrita anteriormente.

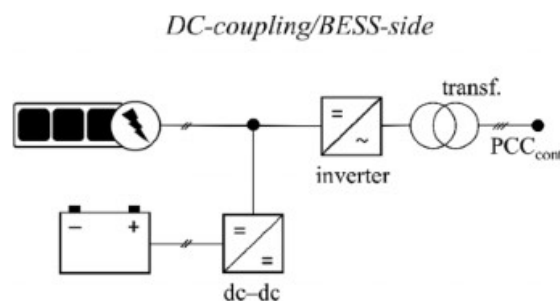


Figura 5-10: Configuración DC-Coupling/BESS

- **Acoplamiento DC / PV:** La configuración con el convertidor dc-dc conectado a la instalación fotovoltaica emplea un único convertidor para establecer la conexión entre el sistema BESS y el punto de conexión a red (PCC). Los módulos fotovoltaicos se encuentran conectados a la parte de corriente continua mediante un conversor dc-dc, al mismo tiempo, dicho conversor asegura los niveles de tensión de la planta fotovoltaica para que esta pueda operar bajo condiciones óptimas de operación. Por otro lado, el inversor gestiona la cantidad de potencia se vierte a la red en el PCC, lo cual implica la gestión sobre el nivel de carga del sistema de almacenamiento. Este tipo de configuración solo es apta para sistemas de almacenamiento distribuidos debido a que el módulo BESS debe estar conectado en el lado de corriente continua de ambos inversores[30]. A continuación se muestra la configuración descrita anteriormente.

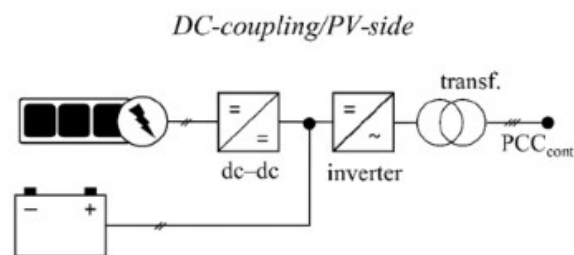


Figura 5-11: Configuración DC-Coupling/PV

A continuación se muestra el rendimiento ofrecido por cada una de las tres configuraciones descritas en comparación con una configuración sin BESS.

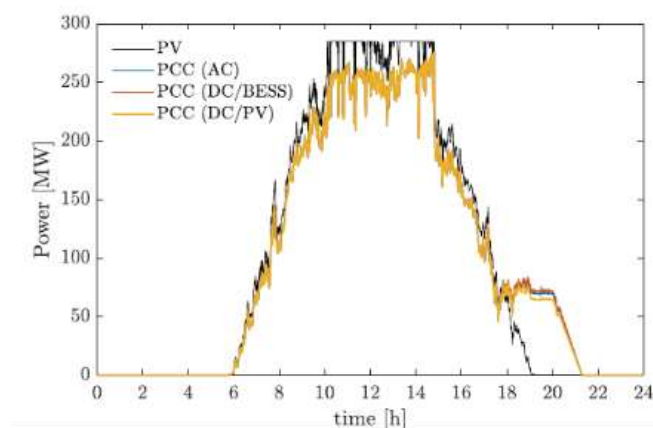


Figura 5-12: Suministro de potencia en función de la configuración

A continuación, se procederá a describir una de las muchas estrategias posibles a la hora de coordinar el sistema de almacenamiento BESS con la instalación de generación fotovoltaica, estando dichas estrategias diferenciadas en función de si son para estados de carga o descarga.

- **Estado de carga:** Como se ha comentado anteriormente, actualmente hay numerosos sistemas de energía eléctrica que están funcionando fuera de sus rangos óptimos de operación debido a las dificultades que implica la integración de las renovables. Dicho problema se basa principalmente en el exceso de generación en las horas de luz, generalmente debido a la alta presencia de instalaciones fotovoltaicas, y a la escasez de generación en horas sin luz solar. La principal y más llamativa opción para efectuar la carga energética de los sistemas de almacenamiento consiste en transferir energía de la instalación fotovoltaica a los módulos BESS en aquellos momentos donde el sistema se encuentre en situaciones de sobre generación, de tal forma que se evite el gasto energético. Podrían darse casos en los que la instalación no estuviese produciendo energía, sin embargo, el sistema podría encontrarse en un estado de sobre generación, en cuyo caso sería óptimo absorber energía de la red para luego inyectar en momentos de escasez energética, apoyando al sistema a volver a su rango operacional nominal. Los sistemas de almacenamiento pueden resultar de gran ayuda cuando actúan de forma combinada con las instalaciones fotovoltaicas en lo que al control de frecuencia se refiere. En muchos sistemas las instalaciones renovables están obligadas a proporcionar unos mínimos en cuanto a control de frecuencia se refiere, en este caso las baterías proporcionarían la energía activa necesaria para satisfacer los requerimientos del control de frecuencia, sin la necesidad de que la planta fotovoltaica modifique su valor de producción y por lo tanto evitando que se desvíe de su punto óptimo de funcionamiento. Para llevar a cabo este tipo de estrategia y explotar así la capacidad de las baterías, es necesario asegurar unas condiciones cíclicas de funcionamiento, es decir que el sistema de almacenamiento se cargue y se descargue durante un ciclo diario de 24h[30].
- **Estado de descarga:** Como se ha descrito anteriormente, de forma habitual las baterías se cargan durante las horas de luz, en consecuencia se debe establecer una estrategia para

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

descargar las baterías durante las horas sin luz solar, con el fin de establecer un proceso cíclico de carga y descarga de 24h. Generalmente las horas de mayor inyección energética a la red coinciden con el atardecer, denominándose el proceso de carga y descarga con los mencionados periodos horarios '*Energy Shifting*'. La predicción de los puntos óptimos de vertido energético a la red depende de numerosos factores como la capacidad de tanto la BESS como la instalación fotovoltaica, el perfil de carga del PCC, la estación del año, la irradiancia solar y por último, los tipos de servicios que la instalación provee al sistema. Cuanto mayor es la capacidad instalada de generación fotovoltaica, mayor será la cantidad de energía producida por fuentes de generación programables durante las horas del atardecer, subiendo dicha cantidad energética hasta que la luz solar desaparece completamente. En definitiva, cuanto mayor es la penetración solar, mayor es la rampa de subida que deben satisfacer los recursos de generación programables durante el atardecer. Este fenómeno es denominado "*duck curve*" y se da en sistemas energéticos con alta penetración de renovables, una de las soluciones principales que se esta aportando en estos casos consiste en la integración de sistemas de almacenamiento energético o BESS que sustituyan parcialmente a los generadores programables, disminuyendo los valores de rampa del sistema de forma automática[30].

Chapter 6. IMPACTO EN EL SISTEMA

6.1 PARTICIPACIÓN EN CONTROL DE FRECUENCIA

La frecuencia es una de las variables que caracteriza el comportamiento de un sistema eléctrico, en consecuencia, es necesario mantener un cierto control sobre dicha variable si se desea que el sistema funcione bajo una serie de estándares pudiendo así proveer energía a los consumidores de una forma apropiada. En caso de que la frecuencia del sistema no tuviese ciertos límites operacionales, y su valor se desviase significativamente de su rango nominal, el sistema podría causar problemas a muchos de los elementos conectados al mismo e incluso, en algunos casos, podría causar un colapso total del sistema. Los valores nominales de frecuencia son 50Hz en Europa y Asia, y 60Hz en Norte América, el origen de dichos valores es de carácter histórico principalmente. Generalmente, el rango de oscilación permitido por los operadores del sistema, en cuanto a frecuencia se refiere, se encuentra en 0,1Hz. Las oscilaciones en el valor de frecuencia de los sistemas eléctricos se deben principalmente a la falta de balance entre la generación y la demanda del sistema en un momento concreto, cuando la generación supera a la demanda, la frecuencia sube, y viceversa. En el momento que la frecuencia alcanza un valor que se desplace más de 0,1Hz del valor nominal, se activan los sistemas de control de frecuencia, dicha respuesta se encuentra dividida en tres niveles, primaria, secundaria y terciaria[31].

El control primario de frecuencia es la primera respuesta del sistema a variaciones en el valor de frecuencia, se caracteriza por activarse de forma automática y tener una rápida respuesta de apenas segundos. Normalmente todos los generadores conectados en alta tensión están obligados a proveer el servicio de control primario de frecuencia, excepto los generadores renovables que no tienen la capacidad de asegurar un cierto nivel de producción en un momento concreto del futuro. Aquellos generadores que si estén obligados a proveer el servicio deben tener una cierta reserva de capacidad para suministrarlo. La función principal del control primario consiste en equilibrar la generación con la demanda de tal forma que el

valor de frecuencia se estabilice y no siga decreciendo/creciendo. En cuanto a los generadores de origen renovable comentar que a pesar de que no estén obligados a proveer el servicio como tal, si que deben estar preparados para acondicionarse y a apoyar levemente al sistema en caso de variaciones no deseadas en el valor de frecuencia. Cuando el requerimiento es de bajada de potencia, no suele haber impedimento, mientras que si es de subida, pueden darse casos en los que dicha aportación al sistema sea imposible. El constante crecimiento en el número de instalaciones renovables, y en respuesta, el notable decrecimiento en el número de centrales de carbón está provocando serias dificultades al operador del sistema a la hora de mantener la frecuencia bajo su rango nominal, de hecho actualmente es uno de los principales problemas que plantea la integración de las renovables, considerándose una de las soluciones más atractivas, la instalación de baterías[31].

El control secundario de frecuencia es llevado a cabo una vez el control primario ha concluido, es decir, cuando se ha equilibrado el balance de generación y demanda. En este punto el valor de la frecuencia se encuentra desviado de su valor nominal, pero se encuentra estable, es decir ni decrece ni tampoco crece. La función principal del control secundario de frecuencia consiste en llevar el valor actual de frecuencia a su valor nominal, para ello, ciertos generadores ofrecen su capacidad para restaurar la frecuencia a cambio de una compensación económica. Por razones de seguridad, generalmente el TSO obliga a que los generadores tengan un porcentaje de su capacidad total habilitada para la regulación secundaria de frecuencia. El control secundario de frecuencia suele ser de carácter automático y se lleva a cabo siguiendo una consigna de frecuencia emitida por el operador del sistema[31].

El control terciario de frecuencia es llevado a cabo una vez ha finalizado el control secundario de frecuencia, en ese momento las reservas empleadas para llevar la frecuencia a su valor nominal han de ser restablecidas para poder hacer frente a nuevas desviaciones de frecuencia, en efecto en eso consiste la labor del control terciario de frecuencia. Para realizar el control terciario, el operador del sistema convoca a una serie de generadores para llevar a cabo la restauración de las reservas del control secundario, por lo general suelen ser generadores que se encuentran en operación, pero en caso de necesidad el operador del

sistema podría pedir la participación de generadores que en ese momento están desconectados.

Como se ha comentado anteriormente, el sistema eléctrico del estado de Nevada se caracteriza por tener un alto nivel de regulación, lo cuál implica la ausencia de mecanismos de mercado para asignar los diferentes servicios que generalmente prestan los agentes al operador del sistema. Debido a la gran similitud que presenta el estado de Nevada con el estado de California se ha decidido describir los diferentes productos de mercado que ofrece el sistema CAISO en lo que a control de frecuencia se refiere[32].

- **Regulation up:** La regulación “up” o incremental se define como la capacidad de los agentes de generación para llevar a cabo incrementos en sus niveles de generación activa de energía de forma instantánea y automática. Tradicionalmente estos incrementos energéticos se llevan a cabo mediante Controles de Generación Automáticos (AGC), además, es necesario especificar que los agentes que provean al operador del sistema con este servicio deben estar conectados y sincronizados con la red. Actualmente, debido a la evolución de las diferentes tecnologías presentes en los sistemas eléctricos, existen otras formas de proveer el mencionado servicio, sin que estas involucren un AGC necesariamente.
- **Regulation down:** La regulación “down” o decremental se define como la capacidad de los agentes de generación para llevar a cabo decrementos en sus niveles de generación activa de energía de forma instantánea y automática. Tradicionalmente estos decrementos energéticos se llevan a cabo mediante Controles de Generación Automáticos (AGC), además, es necesario especificar que los agentes que provean al operador del sistema con este servicio deben estar conectados y sincronizados con la red. Actualmente, debido a la evolución de las diferentes tecnologías presentes en los sistemas eléctricos, existen otras formas de proveer el mencionado servicio, sin que estas involucren un AGC necesariamente.
- **Spinning reserve:** Las “spinning reserves” se definen como la capacidad de los agentes de generación, con reservas de capacidad adicional, para proveer al operador del sistema con una cierta rampa de subida/bajada de generación con un tiempo de margen de 10

minutos y con capacidad para funcionar hasta dos horas. Tal y como indica su nombre “spinning”, los agentes que presten dicho servicio tendrán que estar conectados y bajo condiciones optimas de operación. Generalmente este servicio suele ser empleado por el operador del sistema para mantener la estabilidad de frecuencia durante escenarios de emergencia o para anticipar grandes variaciones en la carga del sistema.

- **Non – Spinning reserve:** Las “Non-Spinning reserves” se define como la capacidad de ciertos agentes de generación para proveer al operador del sistema una cierta rampa de subida con un tiempo de margen de 10 minutos y con capacidad para funcionar durante dos horas. Los agentes que provean el servicio al sistema se caracterizan por estar disponibles pero desconectados de la red en el momento en el que el operador del sistema requiere sus servicios, por lo que deberán tener un tiempo de arranque mínimo para proveer el servicio satisfactoriamente. El mencionado producto de mercado puede ser provisto por agentes de demanda flexible, siempre y cuando sea una carga equipada con equipos de telemidas y sea capaz de cumplir el resto de los requerimientos establecidos por el operador del sistema.

6.2 OTROS EFECTOS

Además del control de frecuencia, existen muchos otros mecanismos de mercado en los que las baterías podrían participar, pudiendo obtener beneficios relevantes de los mismos. En el sistema CAISO existen otros servicios auxiliares además de los relacionados con los servicios de frecuencia, ya comentados anteriormente. De entre ellos destaca el control de tensión y servicio de “black start”.

- **Control de tensión:** Actualmente, uno de los principales objetivos de los sistemas eléctricos alrededor del mundo es garantizar la confiabilidad, seguridad de suministro y calidad de la energía a sus consumidores, el cumplimiento de este objetivo comienza con el control constante de ciertas variables del sistema que deben estar bajo los límites requeridos para mantener la estabilidad del sistema. Una de estas variables mencionadas son las tensiones de los nodos, que, a diferencia de la frecuencia del sistema, es una variable que debe ser controlada localmente. La principal variable que determina la

variación de la tensión en un nodo determinado es la generación/absorción de potencia reactiva en ese nodo. Por ello, el mantenimiento de la tensión de los nodos dentro de los límites establecidos dependerá principalmente de la gestión por parte del operador del sistema de la cantidad de potencia reactiva inyectada en el nodo considerado.

Debido a la gran influencia que tiene el control de la tensión en el correcto funcionamiento del sistema, muchos operadores del sistema han desarrollado diferentes mecanismos para mantener los valores de tensión dentro de los límites. Estos mecanismos suelen estar definidos dentro de los servicios auxiliares que se pueden ofrecer al sistema eléctrico en cuestión, estos servicios se dividen en servicios auxiliares de frecuencia y de no frecuencia. Como su nombre indica, los servicios auxiliares de frecuencia son los encargados de restablecer la frecuencia a su valor nominal cuando se produce un desequilibrio entre la demanda y la generación, algunos de estos mecanismos son reservas de regulación secundaria o terciaria. Por otro lado, los servicios auxiliares no relacionados con la frecuencia se dedican a mantener dentro de unos límites otras variables de la red, como los niveles de tensión, no teniendo estas variables ninguna relación directa con el control de la frecuencia. Estos mecanismos de control auxiliar de la tensión implican a numerosos agentes del sistema, ya sean generadores, DSOs, TSOs o demanda, todos ellos juegan un papel importante en el éxito de este mecanismo[33].

Actualmente, la mayor carga de este servicio auxiliar la llevan los generadores del sistema, ya que son los principales responsables de generar o absorber la potencia reactiva necesaria en cada momento. Debido a la gran importancia de los agentes de generación en el suministro de este servicio, el operador del sistema suele diseñar los mecanismos de control de tensión auxiliar de forma que los generadores deban cumplir ciertos requisitos obligatorios en función de las características de cada generador. En la actualidad, dependiendo del sistema eléctrico del que hablemos, se están implementando mecanismos auxiliares que complementan o transforman el servicio de control de tensión. En concreto, se están implementando diferentes mecanismos de mercado con la intención de aumentar la competitividad de este servicio auxiliar. Esta competitividad se verá incrementada gracias a la retribución del servicio, que convierte al servicio de control de tensión en uno más de los muchos mecanismos que suponen una fuente de

ingresos para los agentes de generación, promoviendo y facilitando, un aumento de la inversión de los agentes externos en el sistema.

Dadas las conocidas características de variabilidad de las diferentes plantas de generación renovable, los sistemas de almacenamiento de energía están adquiriendo un importante papel cuando se combinan con las instalaciones renovables, minimizando el impacto de la variabilidad de generación que éstas presentan en la red. Los sistemas de almacenamiento de energía más utilizados en la actualidad son los BESS (Battery Energy Storage System), que se diferencian principalmente de los sistemas de almacenamiento en que están equipados con sistemas de electrónica de potencia y un convertidor, que permiten que el sistema de almacenamiento proporcione una serie de servicios a la red de forma muy rápida. Además de la principal fuente de valor que aportan los sistemas de almacenamiento (desplazamiento de la carga), también proporcionan importantes beneficios a nivel de la red, como el control de la frecuencia y el control de la tensión. Aunque los BESS suelen participar en los servicios de frecuencia, también tienen la capacidad de proporcionar al sistema apoyo para el control de la tensión, principalmente a través de la producción controlada de potencia reactiva que puede proporcionar el convertidor CC/CA. Este control de la producción de potencia reactiva tiene características y limitaciones técnicas muy similares a las del convertidor CC/CA de las instalaciones fotovoltaicas[33].

En cuanto a las características del producto de mercado ofrecido por el operador del sistema en cuanto a control de tensión se refiere, cabe destacar que actualmente el sistema CAISO no tiene un mercado para asignar el servicio. El operador del sistema asigna el servicio mediante contratos a largo plazo del tipo “Reliability Must-Run”.

- **Black start:** Para comprender correctamente en que consiste el servicio de “Black start” se debe conocer el contexto bajo el cual los sistemas eléctricos incurren en apagones a gran escala. Cuando la red se encuentra operando correctamente, quiere decir que todos los requerimientos de los consumidores están siendo satisfechos por el sistema, es decir, existe sobre capacidad de generación para hacer frente cualquier incremento en la demanda, y las líneas de transmisión no se encuentran bajo ningún tipo de congestión.

Si por cualquier razón se produjese la caída de una línea de transporte del sistema, o si alguna planta de generación sufriese una caída no esperada, bajo el modo de operación comentado anteriormente, siempre habrá recursos de ayuda para suplir las necesidades descubiertas por la caída de los elementos en cuestión[34].

Las empresas del sector junto con los operadores del sistema se preparan para este tipo de eventos elaborando planes de contingencia diaria, mensual y anualmente. Dichos planes de contingencia son diseñados para mantener un correcto funcionamiento del sistema en casos extremos. A la hora de diseñar dichos planes de contingencia, es muy común tener como misión principal la de mantener el sistema bajo rangos de operación nominales si se desea definir un plan de contingencia como satisfactorio.

Sin embargo, imagínese un escenario en el que el sistema eléctrico sufre un apagón a todos los niveles, es decir, que el sistema se encuentra completamente inactivo y por lo tanto no hay electricidad circulando por el mismo. En dicho caso, muchos de los agentes de generación del sistema serían incapaces de encenderse debido que necesitan electricidad para ponerse en funcionamiento. En consecuencia, el operador del sistema necesita agentes de generación que tengan la capacidad de encenderse sin la necesidad de electricidad, de tal forma que poco a poco se pueda ir subiendo la tensión del sistema hasta que otros agentes de generación puedan comenzar su funcionamiento y a apoyar al sistema hasta llevarlo a sus condiciones óptimas de funcionamiento. El servicio “Black start” existe para que los operadores puedan tener bajo su control una serie de agentes con la capacidad de proveer apoyo al sistema en casos de colapso o extrema necesidad.

Aunque el servicio “Black start” fue diseñado para restaurar la potencia del sistema en casos de colapso o apagón total, actualmente también se emplea como servicio de apoyo durante apagones parciales. Por ejemplo, cuando los huracanes dejaron sin electricidad a la mayoría de los consumidores en el estado de Florida en el 2018, el resto del sistema eléctrico del país continuaba funcionando correctamente y por lo tanto habría sido posible la restauración del sistema mediante diferentes activos de generación localizados en otras partes del país. Sin embargo, en dicho caso se emplearon los recursos “Black start” del operador del sistema con el fin de restaurar la normalidad eléctrica en el estado

de Florida de la forma más rápida posible. Si se hubiese restablecido el sistema únicamente mediante agentes de generación externos al estado de Florida, el proceso habría sido de una duración significativa, sin embargo, gracias al empleo del servicio “Black start”, la normalidad operacional se llevó a cabo de forma veloz, reduciendo el tiempo sin electricidad de los consumidores del sistema de semanas a horas e incluso minutos. Para muchos consumidores la existencia y el gasto económico del servicio “Black start” no se considera rentable dado que se entiende que los sistemas eléctricos deben estar preparados para hacer frente a cualquier evento, evitando así que se llegue a un punto de colapso del sistema. Sin embargo, para aquellos consumidores cuyo sistema eléctrico tiene una disposición radial o se encuentra en zonas rurales que se caracterizan por tener sistemas eléctricos frágiles, el servicio de “Black start” es de gran valor y realmente puede aportar valor para los consumidores del sistema de forma relativamente frecuente[34].

Existen una serie de recursos que pueden proveer el servicio de “Black start”, generadores diesel, de propano o de gas son capaces de encenderse sin tener electricidad en la red, lo cual los hace óptimos para proveer el servicio “Black start”. Sin embargo, dichos generadores no son los óptimos para proveer este tipo de servicio dado el origen de su fuente primaria de energía y el bajo grado de sostenibilidad que aportan estas plantas al sistema. En respuesta cada vez más recursos renovables se están adaptando para proveer servicios de “Black start” cuando la red colapsa. Los sistemas de generación solar son generalmente incapaces de proveer apoyo energético a la red cuando esta se encuentra en un estado de colapso, incluso cuando el sol brilla intensamente. Una opción que permite la provisión del servicio “Black start” al sistema siendo de origen renovable, es la instalación de sistemas de almacenamiento, la sincronización de instalaciones fotovoltaicas con sistemas de baterías se ha convertido en los principales sistemas de origen renovable en aportar al sistema servicios “Black start”. Debiéndose principalmente a que las baterías tienen la capacidad de operar de forma autónoma sin la necesidad de estar conectadas a un cierto nivel de tensión.

Chapter 7. ANÁLISIS DE VIABILIDAD ECONÓMICA

7.1 IMPACTO LCOE

En este apartado del proyecto se pretende ilustrar una comparativa entre el LCOE calculado a partir de los datos estándar de una instalación fotovoltaica y el LCOE de una instalación fotovoltaica complementada con una instalación de almacenamiento.

La ecuación empleada para calcular el LCOE de la instalación fotovoltaica se describe a continuación[36].

$$LCOE \left(\frac{\$}{kWh} \right) = \frac{Installation\ Cost + \sum_{n=1}^N \frac{O\&M\ Costs_n}{(1 + Discount\ Rate)^n} - \sum_{n=1}^N \frac{Depreciation_n}{(1 + Discount\ Rate)^n} \times (Tax\ Rate) - \frac{Residual\ Value}{(1 + Discount\ Rate)^N}}{\sum_{n=1}^N \frac{Initial\ AC - Based\ kWh}{(1 + Discount\ Rate)^n} \times (1 - System\ Degradation\ Rate)^n}$$

Data		
General	Cell Technology	Mono-Si
	Package Type	Glass-polymer
	System Type	Single axis track, utility scale
	Location	USA NV Las Vegas
	Inverter Loading Ratio	1,3
Cost	Front Layer Cost (USD/m ²)	3,5
	Cell Cost (USD/m ²)	22,2
	Back Layer Cost (USD/m ²)	2,4
	Non-Cell Module Cost (USD/m ²)	13,6
	O&M Cost (USD/kW _{dc} /year)	20
	BOS Cost, Power-Scaling (USD/W)	0,2
	BOS Cost, Area-Scaling (USD/m ²)	53,38
Performance	Efficiency (%)	20
	Energy Yield (kWh/kW _{dc})	1538
Reliability	System Degradation Rate (%/year)	0,7
	Service life(years)	25
Financial	Discount Rate (%)	6,3

Tabla 1: Datos LCOE

Se debe especificar que el valor obtenido para el LCOE ha sido calculado mediante una calculadora automática, mostrándose dicho valor a continuación[36].

$$LCOE \left(\frac{\$}{kWh} \right) = 0,0378$$

$$Module Price \left(\frac{\$}{W} \right) = 0,23$$

$$Total Installed System Cost \left(\frac{\$}{W} \right) = 0,74$$

Por otro lado, para calcular el impacto del sistema de almacenamiento en el LCOE de la instalación se deberá calcular el término LCOSS, que simula lo que sería el LCOE de la instalación al completo, es decir, teniendo en cuenta tanto la instalación fotovoltaica como el sistema de almacenamiento. A continuación se muestra la fórmula empleada para calcular el LCOSS[37].

$$LCOSS \left(\frac{\$}{kWh} \right) = \frac{I + \frac{F^n}{(1+R)^n} - \sum_{n=1}^N \frac{(D+DF)^n}{(1+R)^n} \times T - \sum_{n=1}^N \frac{(O+C)^n}{(1+R)^n} \times (1-T) - \frac{Rv^n}{(1+R)^n} \times (1-T)}{\sum_{n=1}^N \frac{P \times (1-Dr)^n}{(1+R)^n} \times (1-B) + \sum_{n=1}^N \frac{P \times (1-Dr)^n}{(1+R)^n} \times B \times (1-Lp) + \sum_{n=1}^N \frac{G}{(1+R)^n} \times (1-Lg)}$$

En la siguiente figura se identifican los términos de la anterior ecuación.

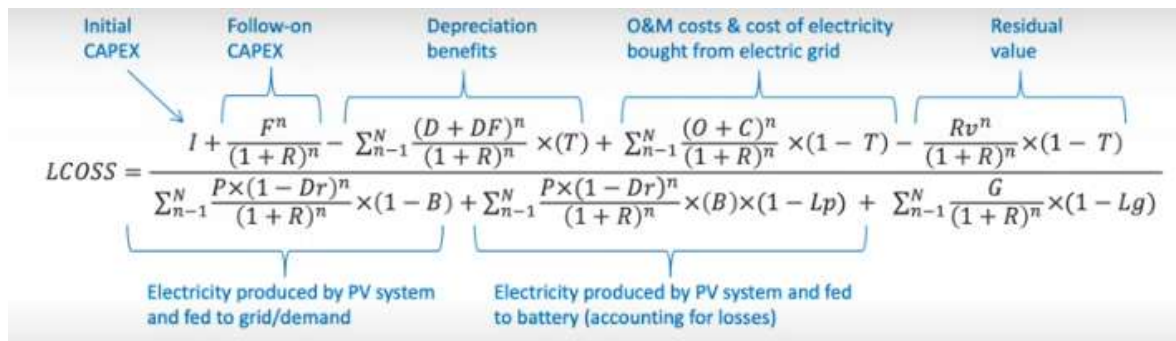


Figura 7-1: Términos fórmula LCOSS[37].

De forma más concreta los términos empleados en el cálculo del LCOSS se describen a continuación.

- *I*: Initial CAPEX
- *F*: Follow-on CAPEX
- *R*: Discount Rate
- *D*: Depreciation from CAPEX
- *DF*: Depreciation from Follow-on CAPEX
- *T*: Tax Rate
- *O*: O&M Costs
- *C*: Cost of electricity bought from the grid
- *Rv*: Residual Value
- *P*: Annual Production
- *Dr*: Degradation PV
- *B*: % of generated solar energy to fed battery
- *Lp*: Roundtrip energy losses from PV-storage-grid
- *Lg*: Roundtrip energy losses from grid-storage-grid

En la siguiente tabla se recogen todos los datos empleados para calcular el LCOSS de la instalación fotovoltaica y el sistema de almacenamiento estudiados en el presente proyecto. Debido a que la instalación se encuentra en un punto prematuro de su construcción, y por lo tanto todavía hay numerosos datos sin conocer, se han supuesto algunos de los factores recogidos en la tabla a continuación[38].

Data	
System Size (MWdc)	237MW PV - 90 MW/360MWh storage
Initial Investment of solar & storage (\$)	374512500
Follow-on Investments (inverter, batteries) (\$)	14568750
Follow-on Investment year	15
Real Discount Rate	5,50%
Tax Rate	25,70%
Residual Value	0
Initial Annual system production (MWh)	547205,31

Percent of generated solar energy to fed battery	30%
Roundtrip Energy Losses from PV/Battery/Grid	10%
Roundtrip Energy Losses from Grid/Battery/Grid	8%
Charging Cost	0
O&M (\$/kW/yr)	22
PV Degradation	0,7
ITC	0%
Inflation	2,50%
Battery Lifetime	15
Battery Usage	75% discharge per day
Additional O&M costs (\$/kW/yr)	10

Tabla 2: Datos LCOSS

A continuación se muestran los valores calculados asociados a cada uno de los términos identificados previamente en la formula del LCOSS.

Cálculo de Términos	
Initial Capex (\$)	374512500
Follow-on Capex (\$)	6525824,595
Depreciation Benefits (\$)	53652447,57
O&M Costs & Cost of electricity bought from electric grid (\$)	60935,50
Residual Value (\$)	0
Electricity produced by PV system and fed to grid/demand (kWh)	5102155784,56
Electricity produced by PV system and fed to battery (kWh)	1967974374,05
Electricity fed from the grid to battery and back again (kWh)	0

Tabla 3: Cálculo de términos LCOSS

Obteniéndose un valor final para el LCOSS de:

$$LCOSS \left(\frac{\$}{kWh} \right) = 0,0463$$

A continuación se muestra una gráfica comparativa de los diferentes valores obtenidos para el LCOE y el LCOSS de la instalación, y la media de los valores de mercado recopilados para dichos ratios[39].

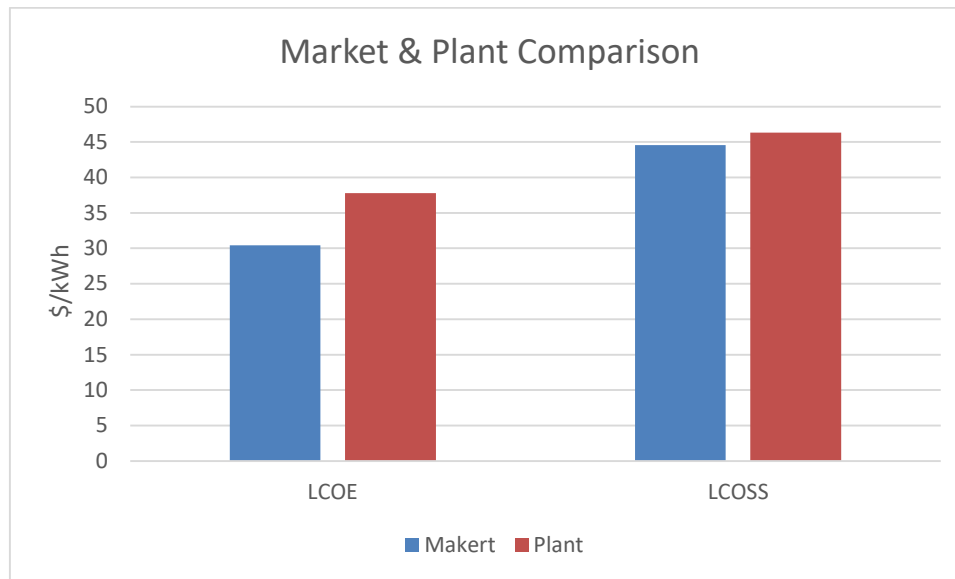


Figura 7-2: Comparación de valores de mercado y valores de planta

Como se puede observar en la gráfica adjunta, el valor de LCOE calculado para la instalación fotovoltaica resulta ser considerablemente superior al valor medio del mercado, a pesar de que se encuentra dentro de un rango razonable de valores, es conveniente proveer una explicación a dicha desviación. El valor LCOE calculado para la instalación se ha llevado a cabo mediante una calculadora online que emplea una serie de parámetros estándar para calcular el LCOE de la instalación. Dichos parámetros son de carácter general y muchos de ellos no son conocidos debido a la prematura fase de desarrollo en la que se encuentra el proyecto, en consecuencia, dichos datos han sido rellenos con valores estándar, de ahí la considerable desviación con respecto a los valores de mercado. Por otro lado, el LCOSS ha sido calculado mediante una fórmula de manera manual y con un mayor volumen de datos, lo cual promueve una mayor exactitud en su cálculo. Efectivamente el valor obtenido para el LCOSS de la planta se asimila significativamente al valor medio de mercado, se encuentra situado ligeramente por encima del mismo, pero se considera un valor razonable.

7.2 OTROS INCENTIVOS

El presente apartado está dedicado a identificar y describir posibles fuentes de ingresos de la instalación fotovoltaica más la instalación de almacenamiento, además de aquellos

obtenidos mediante la inyección controlada de energía en la red. En capítulos anteriores se han identificado una serie de mecanismos de mercado comprendidos dentro de la sección de servicios auxiliares, que podrían ser provistos mediante la instalación objeto de este proyecto. Se reitera que debido a la similitud que presenta el sistema CAISO con el estado de Nevada, los productos de mercado analizados se corresponden con los ofertados en el estado de California. Dichos productos no se encuentran disponibles actualmente en el estado de Nevada debido a que es un sistema completamente regulado y en consecuencia carece de un mercado liberalizado para comercializar con productos energéticos. En consecuencia, el presente apartado se califica como “incentivos de oportunidad” esperándose que en un futuro se puedan acceder a los más adelante mencionados productos de mercado.

- Regulación de frecuencia: Actualmente el mercado de regulación de frecuencia en el sistema CAISO se encuentra ligado al mercado energético, dado que el precio del mercado de frecuencia se calcula a partir del energético, variando su precio acordeamente. Bajo este tipo de regulación los controles de generación automáticos (AGC) reciben una nueva señal cada cuatro segundos[40]. Existen dos opciones para participar en el mercado de regulación de frecuencia del día antes, el *Regulation Energy Management (REM) resource* y el tradicional (*non-REM resource*). En el mercado tradicional de non-REM requiere mantener el valor de potencia durante al menos una hora, en el caso de la instalación de almacenamiento estudiada en el proyecto, cuyas características son 90MW 4h tendrá capacidad para proveer 90 MW cada hora, en consecuencia la máxima capacidad a ofertar en el mercado de regulación de frecuencia sería de 90 MW. Por otro lado, el mercado REM solo requiere mantener la potencia ofertada durante un mínimo de 15 minutos lo cual no supone ninguna ventaja para la instalación estudiada en el proyecto, ya que la capacidad máxima ofertada sería de 90 MW, igual que en la modalidad anterior. En ambas modalidades de mercado el servicio de rampa requerido deberá llevarse a cabo en un máximo de 10 minutos desde el aviso del operador del sistema. De forma adicional cada agente estará obligado a proveer al sistema la potencia ofertada con un rango de variabilidad que no supere el 25% de la potencia contratada

inicialmente, siendo verificado dicho requerimiento por el operador del sistema cada mes.

La remuneración provista a los agentes participantes en el servicio de regulación de frecuencia se calcula mediante la siguiente fórmula.

$$\text{Regulation Payment} = \text{Capacity Payment} + \text{Performance Payment} + \text{Net Energy Settlement}$$

En cuanto a los datos de remuneración obtenidos por los agentes que proveen dicho servicio se debe destacar que abarcan un rango muy amplio y variado. Como se ha comentado anteriormente la remuneración del servicio de frecuencia se encuentra ligada al mercado de energía eléctrica, que varía de forma constante en el sistema CAISO. La remuneración total depende significativamente de la localización nodal donde se aporte el servicio de frecuencia, obteniéndose valores de remuneración desde 12 500 \$/año hasta 40 000 \$/año, con una media de aproximadamente 27 000 \$/año.

- Control de tensión: Actualmente en el sistema CAISO existen dos formas de compensación para el servicio de control de tensión, en primer lugar, se proporciona un pago por capacidad a los agentes provisosores del servicio, y en segundo lugar, un pago por la energía reactiva provista fuera de los requerimientos de red establecidos por el operador del sistema para todos los agentes involucrados en el sistema CAISO.

Un pago por capacidad podría estar destinado a compensar a los recursos por los costes fijos originados por la capacidad del recurso para operar dentro del rango requerido de factor de potencia exigida por la tarifa actual[41]. La ISO ha considerado dos métodos principales para determinar un posible pago por capacidad de potencia reactiva. El método AEP aprobado por la FERC, y un método de "safe harbor". El método AEP divide los componentes del agente generador en dos categorías, en una se clasifican los elementos destinados a la provisión de energía activa, mientras que en el otro se localizan aquellos elementos destinados a la producción o control de energía activa. El operador del sistema analiza dichos elementos y calcula el coste de oportunidad de los mencionados elementos para calcular una remuneración. El método "safe harbor"

consiste en la emisión de pagos constantes a los diferentes agentes provisosores del servicio basándose en la asignación de costes realizadas previamente. Este método suele incurrir en sobre o infra compensaciones debido a su falta de actualización y a la gran exposición a la que se encuentran sometidos los costes de los generadores a la hora de proveer el servicio.

- **Black Start:** A la hora de proveer el presente servicio pueden darse dos casos principales, el agente que se dispone a ofrecer el servicio debe dar a conocer al operador del sistema cuál es la potencia mínima que puede ofertar. Concretar que el pago realizado por dicho servicio se realiza de forma mensual, realizándose un pago por capacidad disponible y otro por capacidad empleada. En función del valor mínimo de potencia, el requerimiento del operador del sistema puede estar por encima o por debajo de dicho número, cuando dicha potencia sea menor que la mínima se darán una serie de condiciones distintas que cuando la potencia es mayor que la mínima, tal y como se describe a continuación[42].

Si la potencia requerida por el operador del sistema es menor que la mínima sucede lo siguiente:

Supongamos que la potencia mínima ofertable por el sistema de almacenamiento es de 45 MW, y la potencia despachada por el operador del sistema es de 30 MW, los pagos que se suceden se ilustran a continuación.

Element	Description	Value
Quantity	Minimun Load Energy	45 MW
Price	Administrative Price	10 \$
Settlement in CC 6470		450 \$

Tabla 4: Remuneración $P < P_{min}$

Sucedíendole la siguiente transacción económica.

Element	Description	Value
Quantity	Meter - Dispatch MW (TEE)	-15 MW
Price	Administrative Price	10 \$
Settlement in CC 6470		- 150 \$

Tabla 5: Extra remuneración $P < P_{min}$

Si por el contrario la potencia requerida por el operador del sistema es mayor que la mínima establecida por el agente, las transacciones económicas que suceden son las siguiente. Imagínese que siendo la potencia mínima ofertada 45 MW, el operador del sistema despacha 60 MW de la instalación.

Element	Description	Value
Quantity	Minimun Load Energy	45 MW
Price	Administrative Price	10 \$
Settlement in CC 6470		450 \$

Tabla 6: Remuneración $P > P_{min}$

Sucedíéndole la siguiente transacción económica.

Element	Description	Value
Quantity	Meter - Dispatch MW (TEE)	15 MW
Price	Administrative Price	40 \$
Settlement in CC 6470		600 \$

Tabla 7: Extra remuneración $P > P_{min}$

En este último caso, el precio administrativo varía en función del tipo de servicio “Black start” provisto al operador del sistema, siendo siempre fijado por el operador CAISO.

Chapter 8. REFERENCIAS

- [1] Rocco Cononica; Kassia Micek. S&P Global Platts, 8 April 2020. <https://www.spglobal.com/en/research-insights/articles/rapid-renewables-growth-brings-challenges-for-us-states-part-i-california>
- [2] IEEE Spectrum “*California’s First-in-Nation Energy Storage Mandate*”, October 2013. <https://spectrum.ieee.org/energywise/energy/renewables/californias-firstinnation-energy-storage-mandate>.
- [3] Acciona, Sostenibilidad para todos. “*Acuerdo de Paris, ¿En que consiste?*”. <https://www.sostenibilidad.com/cambio-climatico/acuerdo-de-paris-en-que-consiste/>
- [4] Naciones Unidas “*Objetivos de Desarrollo Sostenible*”. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [5] International Renewable Energy Roadmap (IRENA). “*Remap 2030. United States of America*”. Enero, 2015.
- [6] K.N. Nwaigwe, P. Mutabilwa, E. Dintwa. “*An overview of solar power (PV systems) integration into electricity grids*”. Julio, 2019. Materials Science for Energy Technologies.
- [7] L. Bird, M. Milligan, and D. Lew. National Renewable Energy Laboratory (NREL). “*Integrating Variable Renewable Energy: Challenges and Solutions*”. Septiembre, 2013.
- [8] U.S. EIA. “*Nevada State Energy Profile*”. Febrero, 2021.
- [9] State of Nevada Governor’s Office of Energy. “*2020 Status of Energy Report*”.
- [10] State of Nevada Governor’s Office of Energy. “*2019 Status of Energy Report*”.
- [11] State of Nevada Governor’s Office of Energy. “*2018 Status of Energy Report*”.
- [12] State of Nevada Governor’s Office of Energy. “*2017 Status of Energy Report*”.
- [13] State of Nevada Governor’s Office of Energy. “*2016 Status of Energy Report*”.
- [14] Public Utilities Commission, Renewable Energy Statutes & Regulations “*CHAPTER 704 - REGULATION OF PUBLIC UTILITIES GENERALLY*”. State of Nevada.
- [15] U.S. EIA. “*California State Energy Profile*”. Febrero, 2021.
- [16] California Energy Commission. “*2020/2019/2018/2017/2016/2015/2014 Total System Electric Generation*”.
- [17] California ISO, Today’s Outlook. “*Supply trend*”. 11/07/2021.
- [18] California ISO, Today’s Outlook. “*Renewables trend*”. 11/07/2021.

-
- [19] California ISO, Today's Outlook. "*Batteries trend*". 11/07/2021.
- [20] International Energy Agency (IEA). "*Annual energy storage deployment by country, 2013-2019*". Jun 2020.
- [21] Deepa Jose, Jhonatan Meza and J S Prashanth. "*Battery energy storage systems (bess) state of the art*". Jan 2021.
- [22] BYD Company Battery-Box. "*The battery for all applications*". 2021.
- [23] Kokam By SolarEdge. "*System Integrator, Energy Storage Solution Provider*". 2021.
- [24] LG Chem, Energy Solutions Company. "*Catalogue ESS Products*". 2021.
- [25] NGK Insulators. "*Sodium Sulfur Battery Catalogue ESS*". 2021.
- [26] Samsung SDI. "*ESS Batteries by Samsung SDI*". 2021.
- [27] Hyosung Corporation. "*ESS for Future Energy Solution*". 2017.
- [28] Skylar Energy LP, Project Developer. "*Documentación técnica sobre desarrollo de proyecto*".
- [29] Jian-Tang Liao, Yung-Sheng Chuang, Hong-Tzer Yang, Men-Shen Tsai. "*BESS-Sizing Optimization for Solar PV System Integration in Distribution Grid*". 2018.
- [30] Lo Franco, F.; Morandi, A.; Raboni, P.; Grandi, G. "*Efficiency Comparison of DC and AC Coupling Solutions for Large-Scale PV+BESS Power Plants*". *Energies* 2021, 14, 4823. <https://doi.org/10.3390/en14164823>
- [31] EE-Power, Technical Article. Pietro Tumino. "*Frequency Control in a Power System*". Octubre, 2020.
- [32] California ISO – Department of market monitoring, Chapter 4. "*Ancillary service market*". Abril, 2008.
- [33] Nicolás Fernández Villoria, TFM. "*Voltage control regulation in systems with high renewable penetration*". Julio, 2021.
- [34] Energy Sage – News, Solar News. Spencer Fields. "*Black start: why it matters*". Febrero 2019.
- [35] California ISO – Documents. "*Black start settlement guide*". Mayo, 2020.
- [36] NREL – Transforming Energy. "*Comparative Photovoltaic Levelized Cost of Energy Calculator*".
- [37] NREL – Transforming Energy. "*Levelized Cost of Solar Plus Storage*".
- [38] NREL. "*PVWatts Calculator*".
- [39] U.S. EIA. "*Levelized costs of new generation resources in the annual energy outlook 2021*". Febrero 2021.

REFERENCIAS

- [40] Raymond H. Bryne, Tu A. Nguyen and Ricky J. Concepcion. “Opportunities for Energy Storage in CAISO”. 2018.
- [41] California ISO – Shaping a Renewed Future. “*Reactive Power Requirements and Financial Compensation – Straw Proposal*”. Agosto, 2015.
- [42] California ISO. “*Black Start Settlement Guide Effective May 2020*”. Mayo, 2020.