



20

Mejoramiento de la Utilización y Eficiencia de Sistemas Eléctricos Mediante Almacenadores de Energía

Ing. Andrés Ghia - Dr Alberto Del Rosso
Área de Pensamiento Estratégico



CÁMARA ARGENTINA
DE LA CONSTRUCCIÓN

Ghia, Andres

Mejoramiento de la utilización y eficiencia de sistemas eléctricos mediante
almacenadores de energía / Andres Ghia y Alberto Del Rosso. - 1a ed. - Ciudad
Autónoma de Buenos Aires : FODECO, 2014.

68 p. ; 29x21 cm.

ISBN 978-987-1915-50-7

1. Sistemas Eléctricos. I. Del Rosso, Alberto II. Título

CDD 621.3

Fecha de catalogación: 07/10/2014



Esta edición se terminó de imprimir en Multigroup SRL
Av. Belgrano 520 - Ciudad de Buenos Aires, Argentina,
en el mes de noviembre de 2014.
www.multigraphic.com.ar

1era. edición - Noviembre 2014
130 ejemplares

Ninguna parte de esta publicación, incluido el diseño de la cubierta, puede ser reproducida, almacenada o transmitida en manera alguna ni por ningún medio, ya sea electrónico, químico, óptico, de grabación o de fotocopia, sin previo permiso escrito del editor.



CÁMARA ARGENTINA
DE LA CONSTRUCCIÓN

MEJORAMIENTO DE LA UTILIZACIÓN Y EFICIENCIA DE SISTEMAS ELÉCTRICOS MEDIANTE ALMACENADORES DE ENERGÍA

Alberto del Rosso & Andrés Ghia

Área de Pensamiento Estratégico

Diciembre 2013

ÍNDICE

RESUMEN	7
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL TRABAJO	9
2. BREVE DESCRIPCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA	11
2.1. Características técnicas Principales de los sistemas de almacenamiento	11
2.2. Costo del Sistema	13
2.3. Almacenaje Hidroeléctrico a través del Bombeo	13
2.4. Almacenaje de Energía de Aire Comprimido	15
2.5. Baterías Electroquímicas	17
2.5.1. Ejemplo - Fairbank Alaska	20
2.6. Flywheels – Volantes Inerciales	22
2.7. Ultracapacitores	24
3. APLICACIONES A SISTEMAS ELÉCTRICOS	25
3.1. Introducción	25
3.2. Tipos de Aplicaciones	37
3.2.1. Cambio de uso en el tiempo (time-shift)	29
3.2.2. Capacidad de Suministro	29
3.2.3. Seguimiento de la carga	29
3.2.4. Regulación de Frecuencia	30
3.2.5. Reserva de Operación	30
3.2.6. Soporte y Control de la Tensión	30
3.2.7. Soporte de Sistemas de Transmisión	31
3.2.8. Reducción o Alivio de la Congestión de Transmisión	32
3.2.9. Diferimiento de inversiones en transmisión y distribución	32
3.2.10. Suministro de Potencia en Subestaciones	32
3.2.11. Optimización del Manejo de la Demanda	33
3.2.12. Mejoramiento de la Confiabilidad del Sistema	34
3.2.13. Mejoramiento de la Calidad de Potencia o Producto Eléctrico	34
3.2.14. Desplazamiento de Generación en el Tiempo – time-shift	35
3.2.15. Adecuación de capacidad firme de Renovables	36
3.2.16. Mejoramiento de la integración a la red	36
4. VALOR ECONÓMICO DE ALMACENADORES DE ENERGÍA - COSTOS REPRESENTATIVOS Y BENEFICIOS	39
4.1. Costos Representativos de Almacenadores de Energía Introducción	39
4.2. Beneficios Economicos de Almacenadores de Energía	42
4.2.1. Beneficios Económicos Derivados de Aplicaciones Simples	42
4.2.2. Beneficios Derivados de Aplicaciones Múltiples	43
4.2.3. Beneficios para la Sociedad en General	45
5. MODELO PARA LA ESTIMACIÓN DE BENEFICIOS DE ALMACENADORES	47
5.1. Introducción	47

5.2.	Estructura General del Modelo	47
5.2.1.	Selección de la Ubicación de la Instalación	48
5.2.2.	Base de datos de Tecnologías de Almacenadores	49
5.2.3.	Base de datos de Aplicaciones	51
5.2.4.	Análisis de Aplicaciones Múltiples	52
5.3.	Ejemplo de Aplicación	53
6.	RESUMEN Y CONCLUSIONES	58
7.	BIBLIOGRAFÍA	59

ÍNDICE FIGURAS

Figura 2-1:	Corte transversal de una Planta de Almacenaje Hidroeléctrico a través de Bombeo	14
Figura 2-2:	Corte transversal de la Planta de Almacenaje de Energía a través de Aire Comprimido	15
Figura 2-3:	Planta de Almacenaje de Energía a través de Aire Comprimido, Alabama CAES	17
Figura 2-4:	Esquema de funcionamiento de un sistema de almacenamiento de energía por baterías ..	18
Figura 2-5:	Batería de plomo-acido (Fuente: EPRI)	19
Figura 2-6:	Batería de Sodio sulfuroso de 1.2 MW/7.2 MWh instalada en el sistema de New York Power Authority (NYPA)	19
Figura 2-7:	Esquema funcional del sistema de batería de GVEA en Fairbanks Alaska [8]	21
Figura 2-8:	Vista de la sala de celdas de la batería de GVEA en Fairbanks Alaska	21
Figura 2-9:	Corte transversal de un Volante Inercial	23
Figura 2-10:	Ultracapacitores	24
Figura 3-1:	Capacidad de Almacenamiento de Energía Eléctrica Instalada en el Mundo [3]	25
Figura 3-2:	Distintos Usos del Almacenamiento de la Energía Eléctrica [3]	25
Figura 3-3:	Posicionamiento de las Distintas Tecnologías de Almacenamiento de Energía	26
Figura 3-4:	Ejemplo ilustrativo de variación de precios de la energía para un usuario final	33
Figura 3-5:	Uso de almacenamiento para desplazar generación eólica en el tiempo [2]	35
Figura 5-1:	Estructura general del modelo para el análisis económico de almacenadores de energía ES-Select™	48
Figura 5-2:	Hoja de ingreso de datos – Selección de la ubicación de la instalación [6]	49
Figura 5-3:	Página principal del modelo ES-Select™ - Selección de aplicaciones y visualización de opciones [6]	50
Figura 5-4:	Ejemplo del valor de cada aplicación particular y su contribución al total	53
Figura 5-5:	Factibilidad de las distintas tecnologías para la aplicación seleccionada – Caso #1	54
Figura 5-6:	Probabilidad de repago en una cantidad de años determinada – Caso #1	55
Figura 5-7:	Factibilidad de las distintas tecnologías para la aplicación seleccionada – Caso #2	56
Figura 5-8:	Probabilidad de repago en una cantidad de años determinada – Caso #2	57
Figura 5-9:	Distribución estadística del periodo de repago para diferentes tecnologías	57

Mejoramiento de la Utilización y Eficiencia de Sistemas Eléctricos Mediante Almacenadores de Energía

RESUMEN

Objetivos del Trabajo

El objetivo de este trabajo es analizar la utilización de almacenadores de energía, en sus distintas variantes y tecnologías, para dotar a los sistemas eléctricos de la flexibilidad necesaria para integrar grandes cantidades de generación renovable variable, mejorando el grado de utilización y la eficiencia de las instalaciones existentes.

Existe una gran variedad de tecnologías para el almacenamiento de energía que pueden utilizarse en muy diferentes maneras para mejorar la forma en que se operan y mantienen los sistemas eléctricos. Por ejemplo, los almacenadores de gran capacidad tales como centrales de bombeo y centrales de aire comprimido pueden utilizarse para balancear las fluctuaciones de potencia de la generación renovable, aplanando el perfil de generación, y por lo tanto mejorando la utilización de las redes de transmisión. Otros tipos de almacenadores, en especial las baterías, pueden utilizarse distribuidos en la redes de distribución y subtransmisión para mejorar las fluctuaciones de tensión y potencia debidas a la generación distribuida (solar fotovoltaica). Otros almacenadores convenientemente localizados y dimensionados sirven para mejorar la estabilidad y control de tensión, permitiendo aumentar la capacidad de ciertos corredores de transmisión.

Estructura del Informe

En el capítulo 1 se presenta una breve descripción de los objetivos perseguidos, de las tecnologías existentes, y del alcance que tendrá el presente informe.

En el capítulo 2 se presenta una descripción breve de los distintos tipos de tecnologías de almacenamiento que tienen aplicaciones en sistemas de potencia.

El capítulo 3 describe las distintas posibles aplicaciones de almacenamiento de energía para resolver problemas de operación, control y calidad de potencia de sistemas eléctricos, así como para mejorar la eficiencia y utilización de las redes de transmisión y distribución.

El capítulo 4 tiene dos secciones: En la primera se describen sección costos representativos de distintos tipos de almacenadores de energía para uso en sistemas eléctricos, mientras que la segunda presenta un resumen sucinto de los potenciales beneficios económicos del uso de almacenadores de energía para las aplicaciones descritas en el Capítulo 3.

En el capítulo 5 se describe un software desarrollado por el Sandia National Laboratory de los Estados Unidos, que tiene por objeto proveer un análisis estimativo de los potenciales usos y beneficios de diferentes tecnologías de almacenamiento.

Finalmente en el capítulo 6 se presentan algunas conclusiones sobre el estudio.

Conclusiones

Las siguientes son algunas de las principales conclusiones de este trabajo:

- Existe una variedad considerablemente amplia de tipos de almacenadores de energía que pueden utilizarse en sistemas eléctricos, en muy variadas aplicaciones. La utilización en la mayoría de los casos es técnicamente viable, el mayor impedimento para una utilización más masiva es el rendimiento económico, o dicho de otra forma, la relación costo-beneficio.
- Una instalación de almacenamiento es generalmente difícil de justificar económicamente si la misma está destinada a una sola aplicación. Sin embargo, si la misma instalación se puede usar para distintos usos, se pueden obtener beneficios muchos mayores que justifiquen la inversión. El uso múltiple de una instalación no es siempre posible. En efecto, las aplicaciones deben ser compatibles entre sí, y el almacenador debe cumplir con determinados requerimientos constructivos y operativos para que la aplicación múltiple sea factible.
- Cuando se describe el rendimiento económico de una instalación de almacenamiento generalmente se consideran beneficios económicos directos, es decir los beneficios puedan internalizarse entre un grupo definido de beneficiarios. No obstante esto, existen otros beneficios que impactan un grupo muy grande de beneficiarios, tales como todos los clientes de la empresa eléctrica, e incluso en algunos casos a toda la sociedad en general (bienestar social). Entre los beneficios se incluyen por ejemplo, la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles: esto se logra como resultado de una mejor integración de renovables, y la reducción de costos mejora la competitividad de empresas, debido al mejoramiento de la confiabilidad y calidad del servicio eléctrico.
- Los beneficios económicos directos pueden no ser suficientes para justificar por sí mismo, el costo de inversión de esta tecnología. Sin embargo la consideración de los importantes beneficios que impactan a un grupo muy amplio de la sociedad puede modificar esta perspectiva, favoreciendo la decisión del uso de almacenadores. Por lo cual, los beneficios globales debieran ser considerados cuidadosamente a la hora de definir políticas de incentivos para el desarrollo y uso de almacenamiento de energía.

1. Introducción y Objetivos del Trabajo

Debido a la combinación de una serie de factores estructurales, económicos y ambientales, los sistemas eléctricos se ven sometidos a mayores exigencias de operación que en cierta medida degrada la utilización eficiente de las instalaciones, y en determinadas circunstancias pueden afectar la confiabilidad del sistema. Estos factores incluyen entre otros el elevado grado de inserción de generación renovable de características variables (especialmente eólica y solar fotovoltaica), el elevado costo de capital que supone dotar a los sistemas de la capacidad necesaria para cubrir la demanda de pico, y las restricciones ambientales para instalar nuevas instalaciones de transmisión.

Existe una gran variedad de tecnologías para el almacenamiento de energía que pueden utilizarse en muy diferentes maneras para mejorar la forma en que se operan y mantienen los sistemas eléctricos. Por ejemplo, los almacenadores de gran capacidad tales como centrales de bombeo y centrales de aire comprimido pueden utilizarse para balancear las fluctuaciones de potencia de la generación renovable, aplanando el perfil de generación, y por lo tanto mejorando la utilización de las redes de transmisión. Otros tipos de almacenadores, en especial las baterías, pueden utilizarse distribuidos en la redes de distribución y subtransmisión para mejorar las fluctuaciones de tensión y potencia debidas a la generación distribuida (solar fotovoltaica). Otros almacenadores convenientemente localizados y dimensionados sirven para mejorar la estabilidad y control de tensión, permitiendo aumentar la capacidad de ciertos corredores de transmisión.

El concepto de almacenamiento de energía no es nuevo, y la mayoría de las tecnologías se han desarrollado hace más de dos décadas. Sin embargo, no se ha producido una utilización masiva de esta alternativa, debido al costo de inversión y mantenimiento y a la falta de estandarización y variedad comercial. No obstante esto, la reducción de costos de instalación y la mayor disponibilidad comercial que se ha logrado en los últimos años han hecho que los almacenadores de energía sean una opción competitiva para mejorar la utilización y eficiencia de los sistemas eléctricos.

El objetivo de este trabajo es analizar la utilización de almacenadores de energía, en sus distintas variantes y tecnologías, para dotar a los sistemas eléctricos de la flexibilidad necesaria para integrar grandes cantidades de generación renovable variable, mejorando el grado de utilización y la eficiencia de las instalaciones existentes.

En análisis se realiza en base a la abundante bibliografía que existe sobre la temática, así como información específica y conocimiento de los consultores. Si bien la existencia del material sobre este tema es cuantiosa, este estudio se basa principalmente en dos fuentes de información, que al mejor saber y entender de los consultores, representan las referencias más conspicuas sobre la materia. Se trata de los realizados por el Electric Power Research Institute (EPRI), y el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE), a través del laboratorio nacional de SANDIA. Estas instituciones han desarrollado investigación sobre almacenamiento de energía por muchos años, produciendo una cantidad significativa de informes técnicos, software y patentes sobre el tema.

La estructura de este informe es la siguiente:

En el capítulo 2 se presenta una descripción breve de los distintos tipos de tecnologías de almacenamiento que tienen aplicaciones en sistemas de potencia.

El capítulo 3 describe las distintas posibles aplicaciones de almacenamiento de energía para resolver problemas de operación, control y calidad de potencia de sistemas eléctricos, así como para mejorar la eficiencia y utilización de las redes de transmisión y distribución.

El capítulo 4 tiene dos secciones: En la primera se describen costos representativos de distintos tipos de almacenadores de energía para uso en sistemas eléctricos, mientras que la segunda presenta un resumen sucinto de los potenciales beneficios económicos del uso de almacenadores de energía para las aplicaciones descritas en el Capítulo 3.

En el capítulo 5 se describe un software desarrollado por el Sandia National Laboratory de los Estados Unidos, que tiene por objeto proveer un análisis estimativo de los potenciales usos y beneficios de diferentes tecnologías de almacenamiento.

Finalmente en el capítulo 6 se presentan algunas conclusiones sobre el estudio.

2. Breve Descripción de Tecnologías de Almacenamiento de Energía

El almacenamiento temporario de la energía permite un mejor aprovechamiento de los recursos energéticos, sobre todo de aquellos cuya producción es variable (eólica, solar, etc.). Permite además en algunos casos desplazar inversiones en capacidad de transmisión y distribución.

Las tecnologías con más avance al día de hoy, son las que se detallan a continuación:

- Reservorios hidráulicos.
- Aire comprimido.
- Baterías.
- Flywheels – Volantes Inerciales.
- Súper Capacitores.
- Almacenamientos Termales.

2.1. Características técnicas Principales de los sistemas de almacenamiento

Se describen a continuación las principales características técnicas y funcionales de sistemas de almacenamiento de energía eléctrica.

Potencia de Salida: La capacidad de potencia disponible para los sistemas de almacenaje, es medida en Kilovatios (KW) o Megavatios (MW).

Los sistemas de almacenamiento por lo general, tienen dos opciones de funcionamiento, una para operación continua y la otra para operación máxima. En la opción de potencia suministrada en forma continua, el sistema de almacenamiento puede funcionar continuamente hasta que esta se queda sin energía disponible. En funcionamiento de potencia máxima, el almacenador puede entregar la potencia durante sólo un período corto de tiempo, antes de volver a la posición de funcionamiento continuo. La opción de potencia máxima es a veces llamada, posición de potencia de pulso. Para la mayor parte de los sistemas de almacenamiento la posición de potencia máxima es varias veces la de funcionamiento continuo.

La característica de potencia de una planta de almacenamiento está determinada fundamentalmente por la interfaz de conexión utilizada para convertir la energía almacenada, no por el tipo de medio de almacenamiento. Hoy en día, cualquier dispositivo de almacenamiento de energía que requiere una interfaz electrónica de potencia con el sistema de corriente alterna puede utilizar un convertidor de fuente de tensión configurado para proporcionar potencia real y reactiva, de forma dinámica, en respuesta a señales de control que cambian rápidamente.

Energía: La capacidad de suministro de energía para sistemas de almacenaje, es medida en Kilovatio por horas (KWh) o Megavatio por horas (MWh). La capacidad de suministro de energía es por lo general especificada en la posición de operación de potencia en forma continua. Por ejemplo, un almacenador de energía

con una disponibilidad de potencia de 10 MW y una capacidad de suministro de 40 MWh, es capaz de entregar 10 MW durante 4 horas.

La energía entregada por un sistema de almacenamiento es dependiente del nivel de potencia en el cual este es operado o demandado. Por ejemplo, el sistema de almacenaje de energía de 10 MW / 40 MWh sólo puede entregar 20 MW de potencia durante 2 horas, y si en cambio es demandado en 5 MW de potencia por hora, puede funcionar durante 8 horas antes de descargarse totalmente.

Duración de descarga: La duración de descarga está relacionada con la capacidad de energía de un almacenador. La duración requerida de descarga o carga varía en un amplio rango dependiendo del tipo de aplicación. Así por ejemplo, un almacenador del tipo ultracapacitor o flywheel tiene la capacidad de entregar una potencia relativamente alta pero por un periodo de tiempo muy breve. Se los utiliza para mejorar el control de tensión, la regulación de frecuencia o mejorar la estabilidad dinámica del sistema. En el otro extremo se encuentran las centrales hidráulicas de bombeo, que pueden descargar su energía durante varias horas.

Interfaz con la red de potencia: Varios tipos de almacenadores están compuestos de celdas modulares de relativamente baja tensión (ej.: baterías), y además son de corriente continua. Estos almacenadores necesitan de un circuito de interfaz para poder convertir la salida de corriente continua en alterna a la frecuencia de la red, y adecuar la salida a la tensión del sistema donde se conectan. La configuración de la interfaz en estos casos consisten normalmente en un convertidores electrónico cuya salida opera a tensión industrial (4 – 6 kV) y un transformador elevador a media o alta tensión, dependiendo de dónde se conecte el almacenador.

Tiempo de respuesta: El tiempo de respuesta requerido para el almacenador depende también de la aplicación. La velocidad en el almacenador puede variar ampliamente desde milisegundos hasta varios minutos. La velocidad de respuesta esta normalmente determinada por la interfaz más que por el almacenador en sí mismo.

Dimensiones físicas y factibilidad de la instalación: Esta característica es muy importante ya que limita la posibilidad de utilizar cierto tipo de almacenadores debido al espacio que requiere la instalación. Las consideraciones ambientales también son importantes a la hora de definir la posibilidad de utilizar ciertos tipos de almacenadores. En algunos el uso en un lugar determinado está limitado por las características propias del dispositivo, por ejemplo, para poder construir una instalación de aire comprimido en caverna se necesitan características geológicas particulares, que están disponibles solo en algunos lugares.

Eficiencia: Los sistemas de almacenamiento como cualquier otro sistema eléctrico producen pérdidas de energía cuando operan. La eficiencia puede variar entre el 75% y 90%, lo cual es relativamente bajo comparado con otros dispositivos y maquinas eléctricas. La eficiencia es importante en aplicaciones donde hay gran intercambio de energía entre el almacenador y la red. En casos donde el almacenador se lo utiliza para

inyecciones rápidas y cortas de potencia – regulación de frecuencia, control de tensión, mejoramiento de la estabilidad – este factor es menos importante, y puede aceptar una eficiencia menor para no incrementar el costo de la instalación.

Vida útil: Tal como ocurre con todos los componentes eléctricos, los almacenadores tienen una vida útil limitada. En muchos casos la vida útil está ligada directamente con la cantidad de cargas y descargas, como es el caso de las baterías. Las baterías se diseñan para una vida útil promedio de entre 20 y 30 años.

2.2. Costo del Sistema

El costo de los sistemas de almacenaje de energía genéricos, siguen dos métodos de medida:

- Costo por unidad de Potencia (USD/KW), y;
- Costo por unidad de Energía (USD/KWh).

El costo por unidad de potencia es usado de una manera similar, al modo que es usado para describir otras inversiones de capital en la industria. Es definido como el costo por unidad de potencia calculado, y puede ser usado como el costo del equipo más instalación.

El costo por unidad de energía es usado de manera diferente, al modo que es usado para describir otras inversiones de capital en la industria. Para almacenaje de energía, los USD/KWh representa el costo por unidad de capacidad de almacenaje de energía. Esta definición es diferente del término que es usado comúnmente en generación, por ejemplo, donde el USD/KWh, representa el costo por unidad de la energía generada. El resultado es que los USD/KWh, utilizados para la energía de almacenaje parecen irrazonablemente altos, comparados con aquellos USD/KWh usados para la generación de energía.

Por ejemplo, el costo de instalación de 200 MW / 1.200 MWh para una planta de almacenaje, es de 300.000 USD, significa que el costo por unidad de potencia es de 1.500 USD/MW, mientras que el costo por unidad de energía es de 250 USD/KWh.

2.3 Almacenaje Hidroeléctrico a través del Bombeo

El almacenaje hidroeléctrico a través del bombeo, por lo general llamado energía de bombeo, es la tecnología más madura y la forma más común de almacenaje de energía eléctrica en escala.

La técnica de Bombeado para el almacenaje de energía, consiste en elevar el agua desde el embalse inferior hasta el embalse superior. De esta manera la energía sobrante que se quiere guardar, es transformada en energía potencial, al elevarla al embalse superior.

La energía es recuperada cuando se permite que el agua fluya desde el embalse superior hacia el inferior, pasando por turbinas hidroeléctricas, regenerando la energía almacenada. La **Figura 0-1** muestra un corte transversal de una planta típica de bombeo.

Las plantas de almacenaje hidroeléctrico a través de bombeo, tienen varias ventajas técnicas sobre otras tecnologías de almacenaje. Esta usa tecnología bien conocida y madura. Las inversiones para la construcción, operación y mantenimiento de turbinas hidroeléctricas son conocidos, y el principio de almacenaje por bombeado hidroeléctrico es muy simple. Este conocimiento ha permitido la construcción de muy grandes instalaciones de bombeo hidroeléctrico. Ninguna otra tecnología de almacenaje de energía ha sido puesta en práctica, con el éxito que ésta ha tenido para almacenar cientos o miles de MW.

Otra ventaja del bombeo es la independencia de la instalación para definir la potencia y la energía de almacenamiento. La capacidad de potencia de una instalación de bombeo depende del tamaño y número de turbinas que generan energía; mientras que la capacidad de energía almacenada depende del volumen de agua almacenado y la elevación del embalse superior. Como consiguiente, la capacidad de energía de una instalación de bombeo hidroeléctrico es independiente de su velocidad de descarga.

El almacenamiento por bombeo también tiene algunas desventajas. El almacenaje por bombeo hidroeléctrico tiene baja densidad de energía relativa. El costo del proyecto puede ser enorme, y el impacto ambiental puede ser significativo. Los sitios donde los proyectos de bombeo pueden ser colocados, son limitados por el medio ambiente geográfico disponible. Además se debe disponer de una cantidad significativa de agua y una diferencia de elevación natural. Si no existe ninguna elevación natural, ambos embalses deben ser creados con una diferencia de cota significativa, encareciendo las inversiones del proyecto.

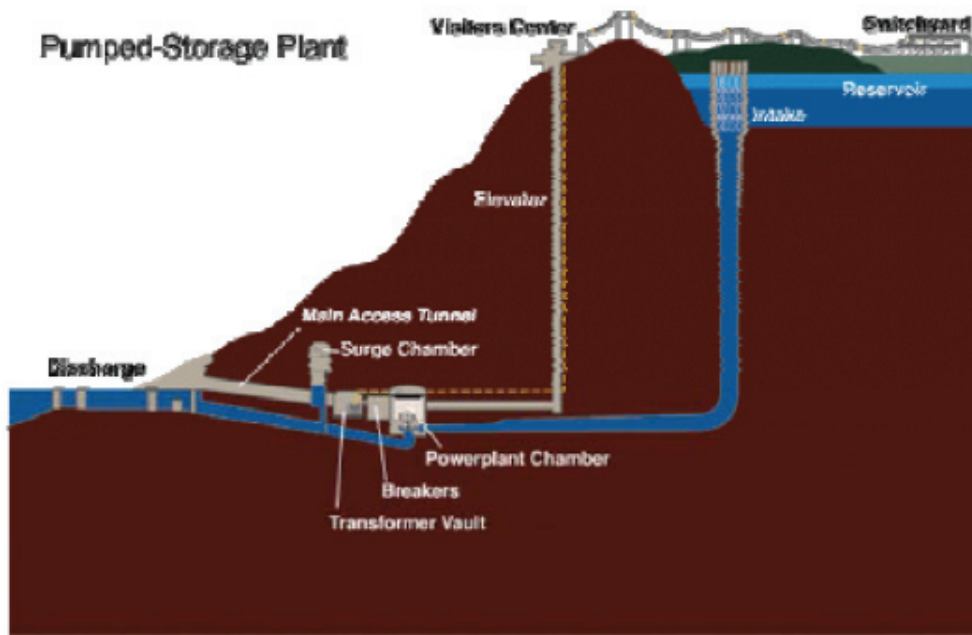


Figura 0-1: Corte transversal de una Planta de Almacenaje Hidroeléctrico a través de Bombeo.

2.4. Almacenaje de Energía de Aire Comprimido

Las plantas de Almacenaje de Energía de Aire Comprimido, almacenan la energía eléctrica comprimiendo y guardando un volumen grande de aire. El aire es almacenado en cavernas subterráneas o acuíferos. La energía es recuperada usando el aire como una entrada para ser utilizada en una turbina eléctrica, acoplada a un generador. Efectivamente, las plantas de Aire Comprimido funcionan comprimiendo el aire en determinados horarios y utilizando la expansión de éste cuando se lo necesite en la turbina. La **Figura 0-2** muestra un ejemplo de una planta de Aire Comprimido diseñada para almacenamiento de electricidad.

La tecnología de Aire Comprimido (AC) tiene varias ventajas como tecnología de almacenaje de energía eléctrica. Al igual que en el caso del bombeo hidroeléctrico, la potencia y la capacidad de almacenaje de energía para una instalación de AC, son independientes.

La potencia de entrada depende del tamaño del compresor, mientras que la potencia de salida depende del tamaño del par turbina-generador. La capacidad de almacenaje de energía depende del tamaño y la capacidad de resistencia de presión de la caverna u otro almacenaje.

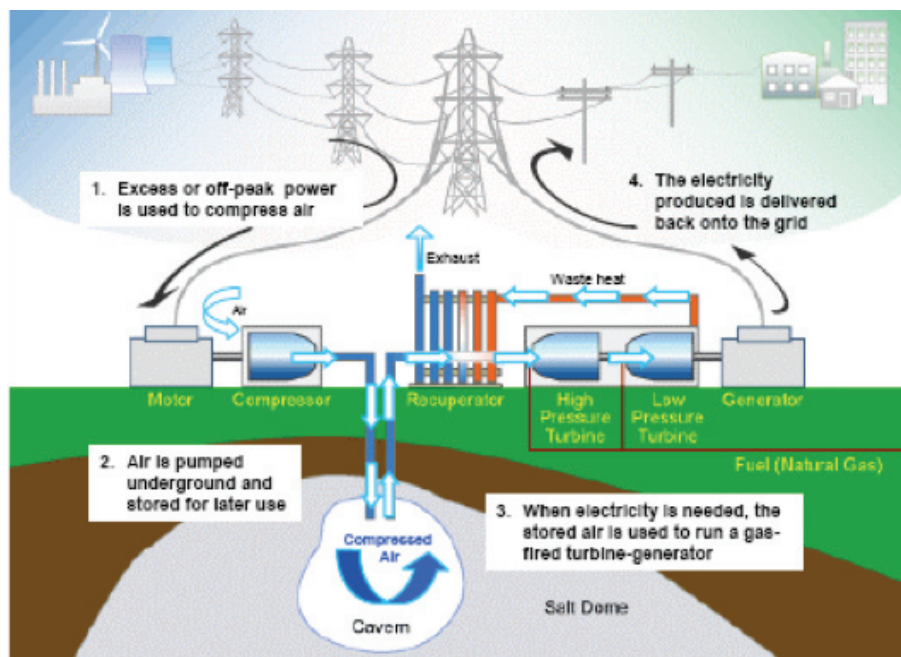


Figura 0-2: Corte transversal de la Planta de Almacenaje de Energía a través de Aire Comprimido

La tecnología Aire Comprimido es por lo general más barata en USD/KW y en USD/KWh que otras tecnologías (con excepción del bombeo hidroeléctrico), y la única condición que se debe cumplir es el disponer del reservorio necesario. Como consiguiente, es considerada muy atractiva como parte integrada a proyectos de generación eólica.

Existen otros dos aspectos de la tecnología de AC, que la hacen diferente de la mayor parte de las otras tecnologías de almacenaje de energía. Los sistemas de AC requieren contenedores de almacenaje de aire

grandes. Los mejores contenedores son apropiadamente clasificados en cavernas o acuíferos, lo que significa que una cantidad significativa de tiempo y esfuerzo deben asegurarse, que un sitio es apropiado y seguro, para un sistema de Almacenaje de Aire Comprimido.

Además, ya que una turbina de combustión por lo general es usada para convertir de nuevo la energía almacenada en los sistemas de AC, requieren una entrada de combustible durante la descarga del Aire. Este aspecto del almacenamiento por AC tiene dos ramificaciones importantes:

- Primero, un suministro de combustible debe ser aplicado en el análisis del almacenamiento del AC. Esto añade otra variable a la ecuación económica, ya que los gastos de hacer funcionar la planta pueden variar dramáticamente con el precio de mercado del combustible.
- Segundo, la salida de energía eléctrica de una planta de AC es realmente mayor que la energía eléctrica que ésta ha almacenado. La energía adicional, viene de la energía de combustión de la entrada de combustible, la cual a menudo es llamada de elevación.

Ya que la eficacia de rendimiento de la entrada sobre salida es calculada, como la salida de energía eléctrica, dividida en la entrada de energía eléctrica, el efecto de elevación por lo general causa que la eficacia de los sistemas de Aire Comprimido se encuentre por arriba del 100 %.

Para solucionar este problema se han propuesto, los sistemas "Adiabáticos" de Aire Comprimido. Estos sistemas almacenan la energía térmica producida durante el proceso de compresión y se la regresa al aire durante el proceso de expansión, eliminando la necesidad de una entrada de combustible durante la descarga. Varios sistemas han sido analizados, pero ninguno ha sido construido hasta el día de hoy.

Hay dos sistemas en existencia de almacenaje por Aire Comprimido. El primero, localizado cerca de Huntorf, Alemania, ha estado en operación desde 1978. La instalación Huntorf es de 290 MW y funciona principalmente como respaldo del sistema eléctrico para amortiguar las cargas variables de rápida variación y como reserva caliente para clientes industriales. Aunque al principio no fue construido para apoyar a las turbinas de viento, ha sido usado recientemente para nivelar la potencia variable de los generadores eólicos en Alemania y servir de reservorio de almacenaje a dicha energía renovable.

La otra instalación, localizada en Macintosh, Alabama, ha funcionado desde 1991. Esta proporciona una variedad de servicios tales como: manejo de la carga, variación rápida de la carga, reserva caliente, y funciona tanto como generador de potencia de pico o como un condensador sincrónico.

En los últimos años, varios proyectos de Almacenaje de Energía a través de Aire Comprimido han sido propuestos en los Estados Unidos, de los cuales tres son destacables.

El primero es la central eléctrica de Norton CAES, localizada en Norton, Ohio. Esta planta es la más grande del mundo y es construida con una capacidad de 2.700 MW.



Figura 0-3: Planta de Almacenaje de Energía a través de Aire Comprimido, Alabama CAES.

Los otros dos proyectos están directamente relacionados con la generación de viento. La primera planta propuesta para construir es en Matagorda en Texas de Oeste, es de 540 MW de capacidad. La otra planta se construirá en Iowa central del norte, cerca de Regate de Fortaleza, es una planta para unos 200 MW de capacidad instalada.

2.5. Baterías Electroquímicas

La batería electroquímica es la tecnología más vieja, la más conocida y la más extensamente usada como forma de almacenaje de energía eléctrica. Ésta fue desarrollada a principios del siglo diecinueve, y jugó un papel importante en las investigaciones tempranas en electricidad.

Las baterías almacenan la energía en forma química. Una celda electroquímica es formada de dos mitades, una mitad positiva y la otra negativa.

- La mitad positiva contiene un electrodo positivo y un electrólito positivo.
- La mitad negativa contiene un electrodo negativo y un electrólito negativo.

El electrodo positivo y el electrólito pueden reaccionar el uno con el otro para liberar la energía, pero sólo en la presencia de una fuente de electrones que pueden ser suministrados al electrodo. Del mismo modo, el electrodo negativo y el electrólito pueden reaccionar para liberar la energía, pero sólo en la presencia de una fuente de electrones de exceso producidos en el electrodo.

Si el electrodo positivo y el electrodo negativo están relacionados por un alambre conductor, el exceso de electrones creados por la reacción en el electrodo negativo, pueden circular para suministrar la reacción en el electrodo positivo. Esto permite que ambas reacciones sucedan. La energía liberada puede ser dirigida eléctricamente, colocando una carga en el camino de conducción entre los dos electrodos.

Las baterías más comúnmente usadas en la industria, son las denominadas secundarias o recargables. En las baterías secundarias, las reacciones químicas en el electrodo pueden ser dirigidas hacia atrás, por la aplicación de una corriente en la dirección inversa a la descarga, absorbiendo energía en el proceso. La absorción y la liberación de la energía pueden ser hechas varias veces, hasta que la batería se desgasta debido al proceso químico o mecánico. Las baterías secundarias son también llamadas a menudo, acumuladores.

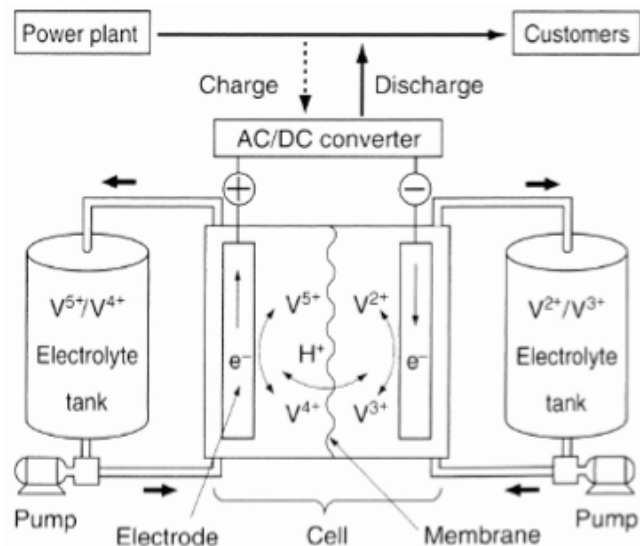


Figura 0-4: Esquema de funcionamiento de un sistema de almacenamiento de energía por baterías

Las baterías tienen la ventaja de ser una tecnología bien entendida en su aplicación. Como en ellas la energía se transforma por medios químicos, éstas tienen mucho más densidad de energía que los dispositivos físicos, basados en procesos como bombeo hidráulico, aire comprimido, volantes, y ultracondensadores.

Las baterías tienden a desgastarse más rápidamente que otros dispositivos de almacenaje de energía, son algo sensibles a las condiciones de uso, en particular a la temperatura. Además, muchas baterías usan materiales ambientalmente tóxicos como plomo y cadmio, que deben ser correctamente eliminados al final del proyecto.

A continuación se describen los distintos materiales y componentes utilizados en la realización de baterías de almacenamiento electroquímico:

- Baterías de Plomo-ácido (lead-acid).
- Baterías de Níquel – Cadmio.
- Baterías de Azufre – Sodio (sodium-sulfur NaS).
- Baterías de Flujo.
- Baterías de Sistemas de Vanadio Redox (Vanadium Redox).
- Baterías de Flujo de Bromo – Zinc (Zn/Br Redox).
- Otras Tecnologías de Batería de Flujo (Fe/Cr Redox, Zn/aire Redox).

Todos estos materiales utilizados para realizar las baterías, han sido bastante experimentado a lo largo de los años y sus aplicaciones dependen de su costo, necesidad de altas densidades, bajo mantenimiento, baja corrosión, tiempo de vida, contaminación y otros usos de la industria.

A modo de ejemplo se muestra una instalación de una batería de ácido.

En la figura se muestra una batería de sodio sulfuroso. Estas baterías se aplican mayormente como soporte en sistemas de distribución, para mejorar la integración de generación distribuida, así como permitir la operación en isla ante contingencias severas. La vida útil de estas baterías de aproximadamente 15 años y soportan hasta 4500 ciclos de carga/descarga.



Figura 0-5: Batería de plomo-acido (Fuente: EPRI)



Figura 0-6: Batería de Sodio sulfuroso de 1.2 MW/7.2 MWh instalada en el sistema de New York Power Authority (NYPA)

2.5.1. Ejemplo - Fairbank Alaska

Otro ejemplo de aplicación de **sistemas de Almacenamiento de Energía mediante Baterías, es el de Fairbank Alaska.**

Esta instalación consiste en un sistema de baterías para mejorar la confiabilidad del sistema eléctrico de la empresa Golden Valley Electrical Association (GVEA) en Fairbank en Alaska Estados Unidos. La batería de níquel-cadmio fue diseñada para proveer una potencia de 27 MW por 15 minutos, o 46 MW por un periodo de 5 minutos. El objetivo principal de la instalación es mejorar la confiabilidad del sistema eléctrico local, el cual era severamente afectado por salida de servicio frecuente de las líneas que alimentan el centro de carga en cuestión¹.

La empresa GVEA suministra electricidad a la ciudad de Fairbanks, la cual se encuentra localizada en la región denominada Railbelt, que se extiende a lo largo de las principales líneas de ferrocarril del estado de Alaska. En esta región se encuentra también la ciudad de Anchorage, que es la mayor ciudad de Alaska con aproximadamente 260,000 habitantes. El servicio eléctrico en esta región esta suministrado por seis empresas cuyas redes se hallan interconectadas. El área se divide en tres zonas: la zona de Fairbank, Anchorage y la península de Kenai. A diferencia de lo que ocurre en la mayoría de los sistemas eléctricos, el pico de demanda en esta región se da en invierno, debido al uso de electricidad para calefacción. La generación local en esa zona está compuesta mayormente por turbinas de gas, con algunas plantas de carbón y gas cerca de Fairbanks, y algunas plantas hidráulicas en la le península de Kenai.

Esta región de Railbelt está aislada eléctricamente y su capacidad instalada es relativamente pequeña – 800 MW. La salida intempestiva de alguna planta de generación o línea principal de transmisión produce importantes cortes de suministro a los usuarios. En particular, en el sistema de la empresa GVEA, esta situación se produce cuando se pierde la interconexión con Anchorage y se está importando potencia desde esa zona, o bien cuando se pierde algún generador importante de la misma GVEA.

El sistema de baterías fue diseñado para aportar mayor estabilidad y mejorar la confiabilidad del sistema eléctrico en la zona de Fairbanks. En caso de un evento severo en la red la batería provee la energía requerida por los usuarios por un tiempo suficiente para arrancar las máquinas turbogas locales. De no contar con las baterías, tales generadores tendrían que estar en servicio en forma permanente para evitar cortes en caso de salida de la línea de interconexión, incrementando significativamente los costos de operación, y por lo tanto la tarifa a los usuarios. La batería se utiliza también para controlar la tensión, mejorar la estabilidad del sistema y suavizar las variaciones de potencia.

La instalación entro en servicio en diciembre de 2003 y ha operado en forma confiable desde entonces. Entre los años 2004 y 2008 se reportaron 267 eventos en la red de potencia en los cuales hubo que utilizar las baterías para evitar interrupciones de suministro a los clientes.

¹Golden Valley Electrical Association Battery Energy Storage System: Engineer-of-Record Report. EPRI, Palo Alto, CA: 2010. 1020639.

El sistema de batería se compone de dos elementos principales: la batería de níquel-cadmio propiamente dicha, y un convertidor electrónico de cuatro cuadrantes que convierte la corriente continua de la batería en corriente alterna para ser inyectada a la red, o absorbida desde la misma cuando la batería se encuentra en modo de carga. Adicionalmente, la instalación posee filtros para minimizar el ripple en la tensión y corriente, y un transformador que convierte de 5000 V en la salida del convertidor a 138 kV en las barras de la subestación. Esta configuración le permite al sistema de batería-convertidor controlar la inyección y absorción de potencia tanto activa como reactiva en un amplio rango de variación, lo que brinda la capacidad de ser utilizada para mejorar el control de tensión y estabilidad dinámica del sistema. La Figura 3-4 representa en forma esquemática la configuración de la instalación. La Figura 3-5 provee una vista del interior de la sala de celdas de la batería.

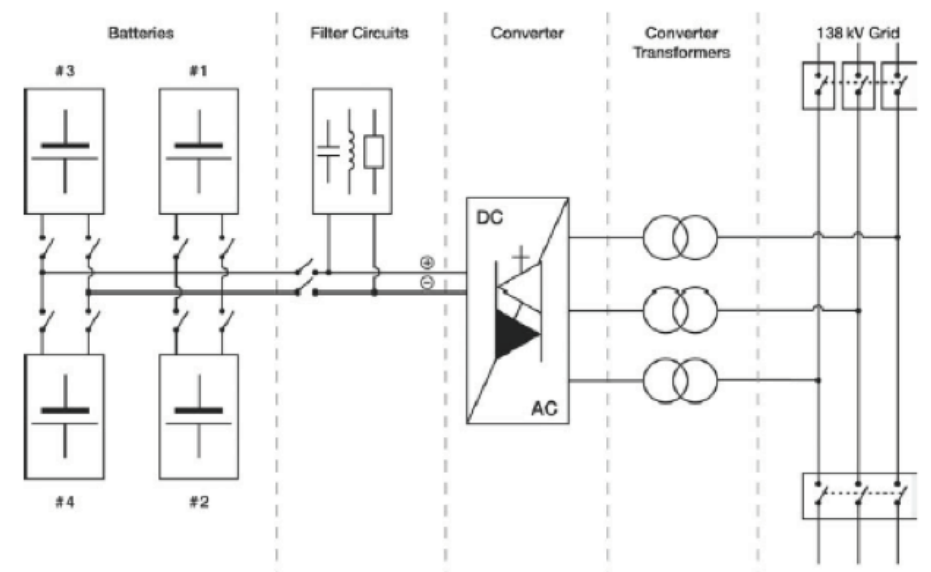


Figura 0-7: Esquema funcional del sistema de batería de GVEA en Fairbanks Alaska [8]

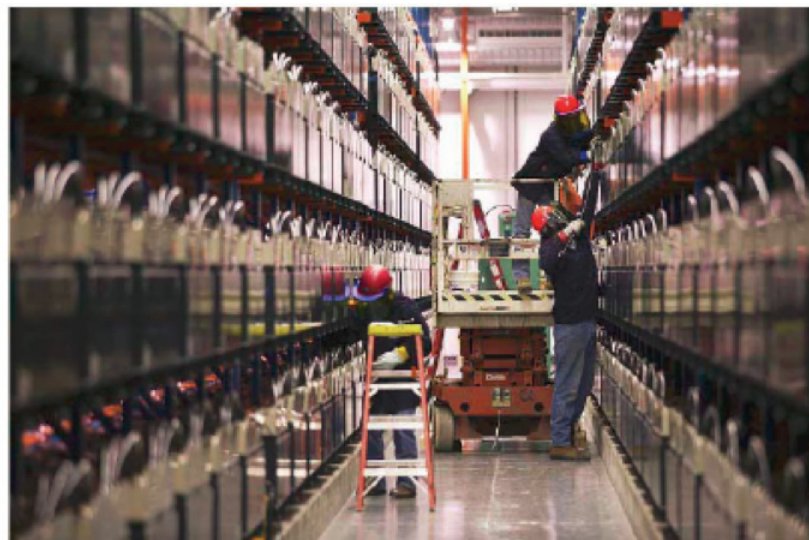


Figura 0-8: Vista de la sala de celdas de la batería de GVEA en Fairbanks Alaska

Se resumen a continuación las características principales de esta instalación:

- Localización: Fairbanks Alaska, Estados Unidos
- Empresa eléctrica: Golden Valley Electrical Association
- Características constructivas y funcionales:
 - « 13.760 celdas de Ni-Cadmio
 - « Peso total: 1500 Ton
 - « Descarga: 27 MW continuo por 15 minutos, o 46 MW por un periodo de 5 minutos
 - « Interfaz con la red: convertidor electrónico de cuatro cuadrantes de 46 MVA continuo, y transformador elevador 5.0/138 kV
- Usos: Mejoramiento confiabilidad, diferimiento de inversiones en transmisión
- Reduce entre 60-70% los cortes
- Costo de instalación: US\$35 millones de dólares americanos
- Comisionamiento: diciembre de 2003
- Vida útil estimada: 25-30 años
- Disponibilidad: 99% desde su instalación hasta el año 2010

2.6. Flywheels– Volantes Inerciales

Los volantes almacenan la energía eléctrica en forma de energía cinética, gracias al ímpetu angular de una masa que gira. Durante la carga, el volante gira acoplado a un motor que se encuentra conectado a la entrada de la energía eléctrica; durante la descarga, el mismo motor actúa como un generador, regresando al sistema la energía almacenada en su masa rotante en forma inercial, produciendo electricidad.

Los volantes tienen varias ventajas sobre las baterías electroquímicas. La mayor parte de los volantes en funcionamiento al día de hoy, han demostrado ser capaces de abastecer varios cientos de miles de ciclos de descarga a máxima demanda y tienen mucho mejor ciclo de vida que las baterías.

El volante tiene eficiencia de ciclo muy alta de más del 90 %, y pueden ser recargados rápidamente cuando han sido descargados. Ya que la energía de un sistema de volante inercial depende del tamaño y la velocidad del rotor, y la potencia depende de la capacidad del motor-generador, entonces la potencia y la energía de almacenamiento son independientes.

Las desventajas del almacenamiento de energía por volantes inerciales, son su relativa baja densidad de energía y pérdidas de reserva grandes.

Los volantes inerciales han sido predominantemente usados en aplicaciones de calidad de potencia, en el cual los volantes proporcionan la energía necesaria para estabilizar las variaciones de la tensión momentánea e interrupciones transitorias. Muchos sistemas incorporan volantes acoplados al rotor del generador para proveer de estabilidad inercial. El volante permite amortiguar interrupciones de aproximadamente 15 segundos de duración.

Los volantes de corta duración también han sido usados para servir cargas fluctuantes en el nivel de distribución, en particular cargas relacionadas con variaciones transitorias. El servicio eléctrico a menudo experimenta fluctuaciones en la carga, relacionadas por ejemplo con el arranque y parada de trenes eléctricos que le introducen perturbaciones al sistema. También se recupera energía y/o se disminuye la demanda cuando frenan y este aporta energía al sistema.

Los volantes son utilizados en las subestaciones transformadoras que proveen el servicio eléctrico al servicio de trenes, para aceptar la energía liberada por el tren durante una parada y luego lo libera para acelerar el tren, cuando éste se pone en marcha. Este sistema de volantes inerciales reducen la demanda eléctrica en el sistema de distribución local, permitiendo la reducción de capacidad de la subestación, haciendo una mejor utilización de los activos T&D, y aplazamiento en la construcción de nueva capacidad.



Figura 0-9: Corte transversal de un Volante Inercial.

Recientemente, la tecnología de volantes inerciales ha sido propuesta para aplicaciones de más larga duración. Beacon Power Corporation, un fabricante de volantes de alta densidad de energía, propone volantes para aplicaciones de regulación de frecuencia en el nivel de transmisión.

Esta aplicación está siendo probada en Nueva York, financiada por la fundación Autoridades de Desarrollo de Energía de Estado de Nueva York (NYSERDA), y en California, financiada por la Comisión de Energía de California (CEC). No hay actualmente ningún proyecto para usar volantes de larga duración, en aplicaciones de generación eólica.

2.7. Ultracapacitores

Ultracondensadores o Ultracapacitores, también conocidos como súpercapacitores, condensadores electroquímicos, capacitores eléctricos de doble capa (EDLC), son dispositivos eléctricos de muy gran tamaño que funcionan bajo el principio del campo eléctrico. Esta tecnología permite condensadores con capacitancia muy alta, medida en faradios o miles de faradios, pero en voltajes relativamente bajos, entre uno y tres voltios. Los sistemas de Ultracapacitores de alto voltaje, consisten en celdas individuales múltiples relacionadas en serie, para producir el voltaje deseado.



Figura 010: Ultracapacitores.

Los ultracapacitores son generalmente caracterizados por ciclos de vida más largos y densidad de potencia más alta que las baterías, pero densidad de energía mucho más inferior. Actualmente, éstos son también bastante caros y requieren de electrónica de control de potencia para la operación apropiada.

La tecnología presente de los ultracapacitores, es apropiada para aplicaciones de corta duración en el tiempo y se utilizan como estabilizadores de la potencia, para otorgar calidad a los sistemas eléctricos. Los fabricantes han investigado su uso como estabilizador de tensión en corriente alterna en los Sistemas de Transmisión, funcionando como reguladores durante las perturbaciones de los sistemas.

También han sido usados para estabilizar el voltaje ante la presencia de cargas de potencias altas, como por ejemplo, el caso de las estaciones de trenes eléctricos y las industrias electro-intensivas. Caso similar al de volantes inerciales. El sistema de ultracapacitores captura la energía del frenado del tren y queda almacenada hasta que sea necesario su uso en el momento de la aceleración del vehículo. Este efecto reduce las consecuencias del proceso de aceleración y frenado en el sistema de distribución eléctrico local, permitiendo reducir la capacidad de los activos de distribución y mejor utilización de los activos existentes.

3. Aplicaciones a sistemas eléctricos

3.1. Introducción

Hay una gran variedad de posibles opciones de almacenamiento de energía para el sector eléctrico, cada una con características únicas de operación, rendimiento y durabilidad. La Figura 01 presenta estimaciones comparativas del total de la capacidad de almacenamiento instalada a nivel mundial al año 2012. Aunque se han instalado muchas formas de almacenamiento de energía, los sistemas de bombeo hidroeléctricos son los más utilizados, con más de 127.000 MW instalados en todo el mundo. Las Instalaciones de Aire Comprimido de Almacenamiento de Energía (CAES), son las que siguen en orden de importancia con 316 MW, seguido por las baterías de sodio-azufre con 35 MW. El resto de los recursos de almacenamiento de energía concentran menos de 85 MW, y consisten principalmente en unas pocas instalaciones de baterías de Ni-Cd, Volantes Inerciales y otros tipos de baterías.

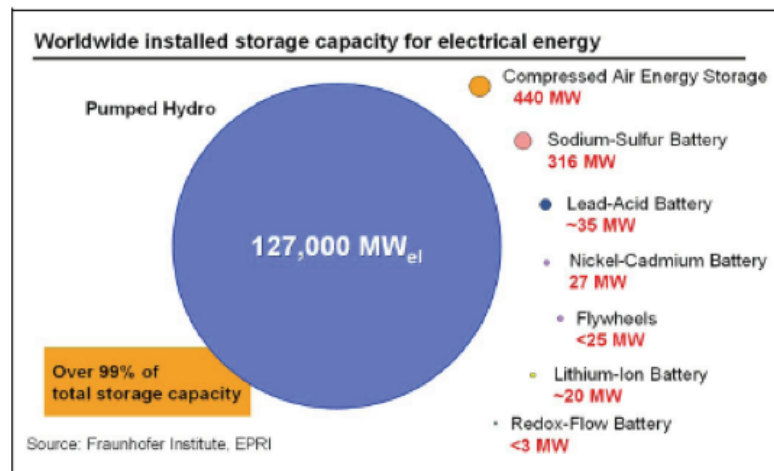


Figura 0-1: Capacidad de Almacenamiento de Energía Eléctrica Instalada en el Mundo [3].

Los usos de almacenamiento en sistemas eléctricos son muy variados, y se aplica en muy diferentes formas en las fases de generación, transmisión y distribución, y uso de la energía eléctrica. La siguiente figura muestra en forma esquemática las posibles localizaciones de almacenadores para servir a estos distintos usos.

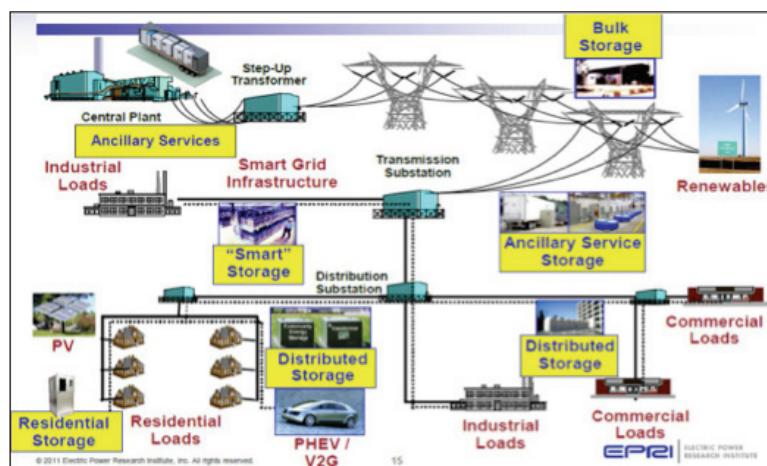


Figura 0-2: Distintos Usos del Almacenamiento de la Energía Eléctrica [3].

En la siguiente figura, extraída de un informe de EPRI, se ilustran en forma comparativa las características de almacenamiento de energía de las diversas opciones tecnológicas y los usos más comunes de las mismas. En el eje X, se representa el tamaño de los módulos constructivos de potencia y en el eje Y, la duración temporal de descarga de energía a la potencia nominal. Estas comparaciones son muy generales y se ofrecen únicamente a los efectos conceptuales, muchas de las opciones tienen una duración y rangos de potencia más amplios a los que se muestran en esta figura.

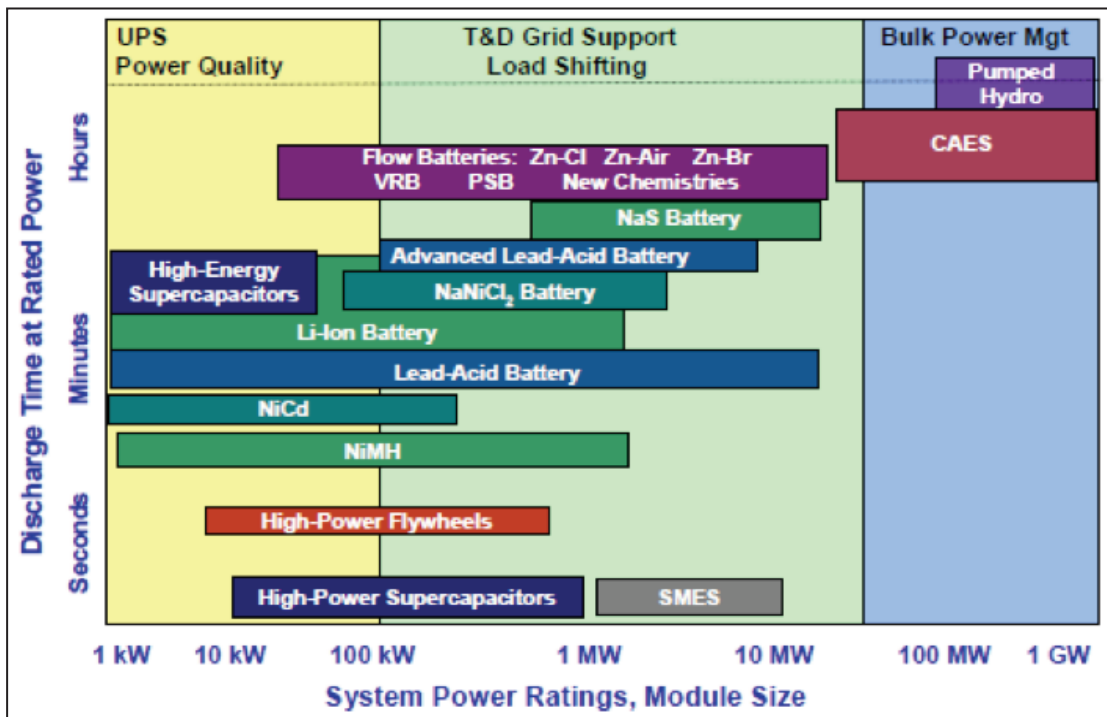


Figura 0-3: Posicionamiento de las Distintas Tecnologías de Almacenamiento de Energía

Las aplicaciones de almacenadores de energía en sistemas eléctricos pueden clasificarse de diversas formas. En forma muy general, las aplicaciones de almacenamiento pueden distinguirse entre aplicaciones de potencia, de capacidad y aplicaciones de energía. Las primeras son aquellas que requieren del almacenador una inyección de una cantidad relativamente grande de energía durante un tiempo breve. Este requerimiento se presenta por ejemplo en aplicaciones para mejorar el control de frecuencia y mejorar la respuesta del sistema de transmisión (estabilidad y control). Entre las tecnologías que poseen estas características se encuentran los SMES (almacenamiento de energía en superconductores magnéticos), flywheels y ultracapacitores.

Las aplicaciones de capacidad son aquellas destinadas a diferir o reducir la necesidad de ampliaciones en el sistema. Por ejemplo, una batería puede instalarse en un lugar estratégico para cubrir los requerimientos de demanda durante situaciones de contingencia, disminuyendo la necesidad de reforzar las redes de distribución o transmisión. Dependiendo del caso, este tipo de aplicaciones requieren una cantidad reducida de ciclos de operación a lo largo del año.

Las aplicaciones de energía por otro lado, requieren el almacenamiento de cantidades relativamente grandes de energía, con tiempo de descarga que pueden variar desde minutos a varias horas. Las tecnologías que presentan estas características son las centrales de bombeo, las de aire comprimido (CAES), almacenamiento térmico y las baterías.

3.2. Tipos de Aplicaciones

Si bien la clasificación anterior en tres categorías da una visión genérica de las distintas aplicaciones, se necesita de una clasificación más detallada para identificar las características técnicas que debe reunir cada tipo de aplicación. En este aspecto, EPRI categoriza 10 tipos de aplicaciones que cubren las tres actividades principales, generación, transmisión, distribución, y usuario final o demanda. Por otro lado, el informe del Departamento de Energía (DOE) de Estados Unidos identifica 16 aplicaciones, agrupadas en 5 grupos, tal como se resumen en la Tabla 0-1.

Se provee en esta sección una breve descripción de cada una de estas aplicaciones, destacando los principales requerimientos técnicos. También se provee una descripción de las posibles sinergias que existen entre los distintos usos o aplicaciones. Tal aspecto es de gran importancia, ya que tal como se describe más adelante, el uso de almacenadores de energía resulta económicamente atractivo en muchos casos solo cuando una misma instalación se utiliza para distintas aplicaciones. Desde ya para que tal sinergia sea posible, los requerimientos técnicos de las diferentes aplicaciones tienen que ser compatibles entre sí.

Categoría	Aplicación
1. Suministro de Energía	Cambio de uso en el tiempo (time-shift)
	Capacidad de suministro
2. Servicios complementarios	Seguimiento de la carga
	Regulación
	Reserva de operación
	Soporte y control de tensión
3. Red de potencia	Soporte de sistemas de transmisión
	Reducción de la congestión en transmisión
	Diferimiento de inversiones en transmisión y distribución
	Suministro de potencia a subestaciones
4. Usuario final	Time-of-use (TOU) Gestión de Costos de Energía
	Optimización del manejo de la demanda
	Mejoramiento de la confiabilidad
	Mejoramiento de la calidad de potencia
5. Integración de renovables	Desplazamiento de generación en el tiempo
	Adecuación de capacidad firme
	Mejoramiento de la integración en la red de la G. Eólica

Tabla 0-1: Aplicaciones de Almacenadores de Energía en Sistemas Eléctricos (Fuente [5])

Claramente, el tipo de aplicación requerido en cada caso determina las características técnicas que debe reunir el sistema de almacenamiento destinado a tal fin. Estos requerimientos pueden ser muy variados dependiendo de cada caso particular, sin embargo es posible identificar características generales que definen a grandes rasgos los tipos de tecnologías y sus usos. La Tabla 0-2 presenta un resumen genérico de las características técnicas más importantes que deben reunir los almacenadores de energía para las aplicaciones descritas anteriormente, con respecto a la capacidad de potencia, el tiempo de carga y la cantidad de operaciones o ciclos de operación por año. Dicha tabla ha sido elaborada en base a información del informe de EPRI [4] y del informe de SANDIA [5]. Debe destacarse que estos son valores muy generales que han surgido de investigaciones y de proyectos de demostración llevados a cabo por esas dos entidades. Se observa que en muchos casos los valores varían en un rango muy amplio, especialmente en lo que respecta a la capacidad, ya que para un mismo tipo de aplicación, esa característica puede variar en gran medida dependiendo de diversos factores propios de cada caso en particular.

Aplicación	Capacidad	Duración descarga	Ciclos
Suministro de energía			
Cambio de uso en el tiempo (time-shift)	10-500 MW	2-10 hr	300-400/año
Capacidad de suministro	10-500 MW	2-10 hr	
Servicios Complementarios			
Seguimiento de la carga	1-100 MW	2-4 hr	
Regulación de frecuencia	1-100 MW	15 minutos	>8000/año
Reserva de operación	10-100 MW	1-5 hr	>5000/año
Soporte y control de tensión	1-10 MW	1-15 minutos	
Red de Potencia			
Soporte de sistemas de transmisión	10 MW	2 seg. – 30 minutos	<10 /año
Reducción de la congestión en transmisión	1 – 100 MW	2-6 horas	
Diferimiento de inversiones en transmisión y distribución	1-100 MW	2-6 horas	300-500/año
Suministro de potencia a subestaciones	1.5 – 5 kW	8-16 horas	
Usuario Final			
Optimización del manejo de la demanda	1 kW – 1 MW	4-6 horas	400-1500/año
Mejoramiento de la confiabilidad	50 kW – 10 MW	5 min. – 1 hora	<50 /año
Mejoramiento de la calidad de potencia	0.2 – 10 MW	10 seg. – 10 min	<50 /año
Integración de renovables			
Desplazamiento de generación en el tiempo	1 kW – 500 MW	3 – 5 horas	300-500 /año
Adecuación de capacidad firme	1 kW – 500 MW	3 – 5 horas	300-500 /año
Mejoramiento de la integración a la red	1 – 10 MW / distribuido 100 – 400 MW / centralizado	15 – 25 minutos	5000 /año

Tabla 0-2: Requerimientos generales de aplicaciones de almacenadores SSEE ([4][5])

A continuación se realiza una descripción resumida de cada una de las aplicaciones. Una descripción detallada de las mismas puede encontrarse en el informe de DOE-SANDIA [5].

3.2.1. Cambio de uso en el tiempo (time-shift)

La energía eléctrica diferida (time-shift) implica la compra de energía eléctrica barata, disponible durante los períodos en que el precio es bajo, para que la energía almacenada pueda ser utilizada o vendida en un momento posterior, cuando el precio es alto.

Entre las posibles sinergias de esta aplicación con otras aplicaciones se encuentran la capacidad de suministro eléctrico, diferimientos de ampliaciones de sistemas de transmisión y distribución, el alivio de la congestión de la transmisión, mejoramiento de la confiabilidad y de la calidad de potencia.

3.2.2. Capacidad de Suministro

Dependiendo de las circunstancias de un sistema de suministro eléctrico, el almacenamiento de energía se podría utilizar para diferir y / o para reducir la necesidad de incorporación de nueva generación para cubrir los picos de demanda. En regiones donde existen mercados eléctricos, un almacenador que preste este servicio podría recibir una remuneración por cargo de potencia, en forma similar al pago que reciben los generadores por ese tipo de servicio. Generalmente se utilizan centrales de gas de ciclo abierto para cubrir la demanda de pico.

Dependiendo de la localización del almacenamiento utilizado, esta aplicación puede ser compatible con las siguientes aplicaciones: regulación, soporte de tensión, diferimiento de inversiones en sistemas de T&D, reducción de la congestión, y mejoramiento de la confiabilidad y calidad de potencia.

3.2.3. Seguimiento de la carga

La demanda de potencia en un sistema eléctrico varía en forma constante. En general se distinguen dos tipos de variaciones. Una es la variación que se produce a lo largo de las horas del día que sigue un patrón de cambio bastante definido. A este cambio se lo conoce como curva de carga diaria. El operador del sistema eléctrico debe procurar la generación necesaria para cubrir esas variaciones de la demanda, despachando unidades de generación a medida que sea necesario. El despacho de generación se efectúa normalmente hora a hora. Durante el transcurso de una hora determinada, los cambios en la demanda que se producen en esa hora se cubren con la generación que esta despachada, para lo cual es necesario mantener un determinado nivel de reserva de generación. En algunos sistemas a ese proceso de lo denomina "seguimiento de la carga". En algunos casos pueden utilizarse sistema de almacenamiento para realizar este seguimiento de la carga.

El otro tipo de variación está caracterizado por una variación aleatoria de la carga, de mucha menor amplitud y de mayor frecuencia que la variación horaria. Las correcciones de la generación para hacer frente a esa variación es lo que se conoce como "regulación", y se describe en el apartado siguiente.

3.2.4. Regulación de Frecuencia

La regulación de frecuencia se utiliza para reconciliar las diferencias momentáneas entre la oferta y la demanda, y mantener la frecuencia del sistema dentro de los valores definidos. En sistemas eléctricos donde existen varias áreas de regulación, como es el caso de los sistemas norteamericano y europeo, la regulación también implica la gestión de los flujos de intercambio entre áreas para mantenerlos dentro de los valores programados. En el caso del sistema argentino existe una sola área de control, por lo que la regulación se limita al control de la frecuencia.

La característica de respuesta rápida (velocidad de rampa) de algunos tipos de tecnologías hace que el almacenamiento sea especialmente valioso como recurso de regulación. Ejemplo de dichas tecnologías son: volantes inerciales, condensadores y algunos tipos de baterías.

La regulación es un servicio muy bien remunerado en algunos sistemas eléctricos, por lo que el uso de almacenadores para tal fin en esos casos resulta muy atractivo económicamente.

3.2.5. Reserva de Operación

La operación eficiente de una red eléctrica incluye el uso de la reserva de capacidad de generación eléctrica (capacidad de reserva) que se puede recurrir cuando parte de los recursos de alimentación eléctrica normales dejan de estar disponibles de forma inesperada. En algunos sistemas la reserva de operación se cataloga dentro de los denominados servicios complementarios.

Existen diferentes tipos de reserva de generación, que en los diferentes sistemas eléctricos se las clasifican de muy variadas formas. En general, se distinguen dos tipos de reserva: reserva rotante o en línea, y reserva fría o no sincronizada. La primera está dada por la capacidad de generación remanente de las máquinas que están despachadas, y que puede responder en plazo de algunos segundos para mantener la frecuencia. Por otro lado, la reserva fría está constituida por generadores que no están operando pero que pueden ser arrancados y suministrar potencia en el lapso de algunos minutos.

Ciertos almacenadores con capacidad de potencia y energía pueden utilizarse para proveer este servicio. El almacenador en este caso no sigue un ciclo de carga-descarga frecuente, sino que se mantiene cargado y disponible en caso de ser requerido. Un aspecto importante a destacar es que, a diferencia de un generador, un almacenador que este en su ciclo de carga puede servir también para proporcionar reserva. En efecto, de ser necesario se interrumpe inmediatamente el ciclo de carga lo que representa una disminución de la demanda inmediata para el sistema. Por otro lado, dependiendo del estado de carga al momento en que se produzca el evento, el almacenador podría también suministrar lo almacenado.

3.2.6. Soporte y Control de la Tensión

Un desafío técnico importante para los operadores eléctricos de la red es mantener en forma estable los niveles de tensión. En la mayoría de los casos, cumplir con ese tema requiere de la administración de un fenómeno llamado "potencia reactiva". Esta potencia se produce porque los equipos que generan, trans-

miten, o utilizan electricidad, a menudo presentan características de inductores y condensadores que son los que la producen.

Para gestionar el reactivo al nivel de la red del sistema, los operadores dependen de un servicio complementario llamado "soporte de tensión". El propósito de éste, es el de compensar los efectos del reactivo, para que la tensión de la red del sistema se pueda restaurar o mantener.

Históricamente, el apoyo al sostenimiento de la tensión ha sido proporcionado por los recursos de generación. Estos recursos se utilizan para generar potencia reactiva (VAR) que compensa el reactivo en las redes. Las nuevas tecnologías (por ejemplo, almacenamiento de energía modular, electrónica de potencia, sistemas de comunicaciones y control), permitieron nuevas alternativas para el soporte de tensión cada vez más viable.

Los capacitores convencionales de corrección del factor de potencia, son buenos para la gestión del reactivo localizado que se produce durante las condiciones normales de funcionamiento, sin embargo, no funcionan bien como un recurso de soporte de tensión. Esta es una aplicación para la cual el almacenamiento distribuido puede ser especialmente atractivo, debido a que la potencia reactiva no puede ser transmitida eficazmente a través de largas distancias. Muchos de los principales cortes de energía son por problemas relacionados con la transmisión de la potencia reactiva a los centros de carga. Por lo tanto, los almacenamientos distribuidos ubicados dentro de los centros de carga donde se produce la mayor parte de reactivo, ofrecen un interesante soporte de tensión.

Las tecnologías de almacenamiento utilizadas para soporte de tensión deben tener la suficiente capacidad de apoyo en VAR, si van a ser utilizadas para inyectar potencia reactiva. Además, el almacenamiento utilizado para soporte de tensión debe recibir y responder rápidamente a las señales de control apropiadas. El tipo de tecnología que es utilizado para almacenamiento que aplica como soporte de tensión, debe estar disponible en forma casi instantánea, dentro de los pocos segundos, y tener reserva de energía para cubrir la carga algunos minutos, o quizás una hora.

3.2.7. Soporte de Sistemas de Transmisión

El almacenamiento de energía utilizada para el soporte de transmisión mejora el rendimiento y eficiencia de las redes mediante la compensación de anomalías eléctricas y perturbaciones tales, como huecos de tensión, inestabilidad del voltaje y la resonancia sub-síncrona. El resultado es un sistema más estable con un rendimiento mejorado.

El almacenamiento de energía a ser utilizado para el soporte de transmisión, debe tener un tiempo de respuesta por debajo del segundo, operación parcial de estado de carga, y muchos ciclos de carga-descarga. Por lo tanto, los sistemas de comunicación y control juegan un importante rol para esta aplicación. Además, el almacenamiento que se utiliza para soporte de transmisión debe ser muy fiable. Por otro lado, el almacenamiento más beneficioso debe suministrar energía tanto activa como reactiva.

La duración de descarga típica debe ser entre uno y veinte segundos. La duración de descarga estándar asumida para esta aplicación es de cinco segundos.

3.2.8. Reducción o Alivio de la Congestión de Transmisión

La congestión en los sistemas de transmisión se produce cuando la operación económica del sistema hace que los flujos de potencia por la red superen la capacidad de transmisión de algunas líneas o corredores de transmisión. La consecuencia directa de la congestión es un mayor costo de operación del sistema, ya que se restringe el acceso a la generación de menor costo. En algunos casos, las restricciones de la red de transmisión limitan el despacho de generación renovable – hidráulica y/o eólica – lo que trae como consecuencia un desaprovechamiento de esas de esos recursos.

Algunos tipos de almacenadores pueden utilizarse para reducir los costos y gastos relacionados con la congestión. En esta aplicación, los sistemas de almacenamiento se deben instalar aguas abajo de la porción congestionada del sistema de transmisión. La Energía debe ser almacenada en los periodos donde no hay congestión, para posteriormente ser entregada al sistema donde se presenta mayor exigencia al sistema de transmisión.

La duración de la descarga necesaria para el alivio de la congestión así como la frecuencia de uso es muy variable, dependiendo fuertemente de cada caso particular. En algunos casos puede tratarse de algunas horas al año en horas de máxima demanda, y en otros casos puede ocurrir con mucha mayor frecuencia, por ejemplo en el caso de generación renovable vinculada a puntos de la red con escasa o limitada capacidad de transmisión.

3.2.9. Diferimiento de inversiones en transmisión y distribución

El diferimiento de inversiones en transmisión y distribución significa retrasar ciertas ampliaciones de las redes necesarias para suministrar la demanda creciente, haciendo uso de almacenadores aguas abajo del sistema sobrecargado. En esta aplicación el almacenador se carga durante las horas de menor demanda y se descarga en las horas de pico donde la capacidad de la red no es suficiente para suministrar toda la demanda.

En algunos casos el ahorro financiero de aplazar en el tiempo la ampliación de las redes puede ser significativo. Por ejemplo, en caso de una zona de carga alimentada en forma radial por una línea de transmisión de relativamente gran longitud, cuya capacidad de transmisión no es suficiente para alimentar la demanda de pico. Si esa demanda pico se produce solo unas horas al año, con un crecimiento interanual reducido, la solución basada en almacenadores (por ejemplo baterías) puede resultar ventajosa.

3.2.10. Suministro de Potencia en Subestaciones

En los EE.UU hay por lo menos 100.000 sistemas de almacenamiento de energía que utilizan baterías en las subestaciones de potencia. Ellos proporcionan energía a los componentes de conmutación, para la comunicación de la subestación y equipos de control, cuando la red no está energizada. La gran mayoría de estos sistemas utilizan baterías de plomo-ácido, la mayoría ventilados y en menor medida con válvula reguladora, con el 5% de los sistemas que están alimentados por baterías de níquel-cadmio. Estos sistemas poseen

menor necesidad de mantenimiento de rutina, una mejora de la confiabilidad y la vida útil de la batería tendría alternativas atractivas, especialmente si el costo es comparable al de las tecnologías tradicionales. La duración de descarga requerida para esta aplicación varía entre 8 a 16 horas.

3.2.11. Optimización del Manejo de la Demanda

Los usuarios finales de energía pueden usar almacenamiento de energía para reducir sus costos totales de electricidad, mediante dos mecanismos: a) reducción del pago por energía, y b) reducción del pago por potencia, tal como se describe a continuación:

a) Reducción del pago por energía

En este caso los usuarios cargan sus almacenadores durante los períodos donde el precio de la energía es menor (horas fuera de horas punta), para descargar la energía en momentos en que los precios son más altos. A este procedimiento también se lo denomina en inglés Time-of-Use (TOU). Es similar al cambio de uso en el tiempo descrito más arriba dentro de la categoría "Suministro de Energía", con la diferencia que en este los precios de la energía eléctrica están dados por las tarifas al usuario final, y no por el costo de generación, o precio de mercado en caso de sistemas con mercado mayorista eléctrico.

La figura siguiente muestra un ejemplo ilustrativo de este caso. En este ejemplo el precio de la energía es de 32 ¢USD/KWh en horas punta (12:00 p.m. a 6:00 p.m.), 15 ¢USD/KWh en horas de semi-punta (8:30 am a 12:00 pm y de 6:00 p.m. a 9:30 p.m.), y 10 ¢USD/KWh en horas de mínima demanda (9:30 p.m. a 8:30 a.m.). La duración máxima de descarga para esta aplicación se determina sobre la base de la tarifa correspondiente, que en este caso está dado por las horas que dura la demanda de alto costo (12:00 p.m. a 6:00 p.m.). Por lo cual en este caso el almacenador debe diseñarse para una descarga de seis horas.

Las sinergias con otras aplicaciones incluyen cambio de uso en el tiempo (desde el punto de vista del suministro), mejora de la calidad y confiabilidad del servicio eléctrico.

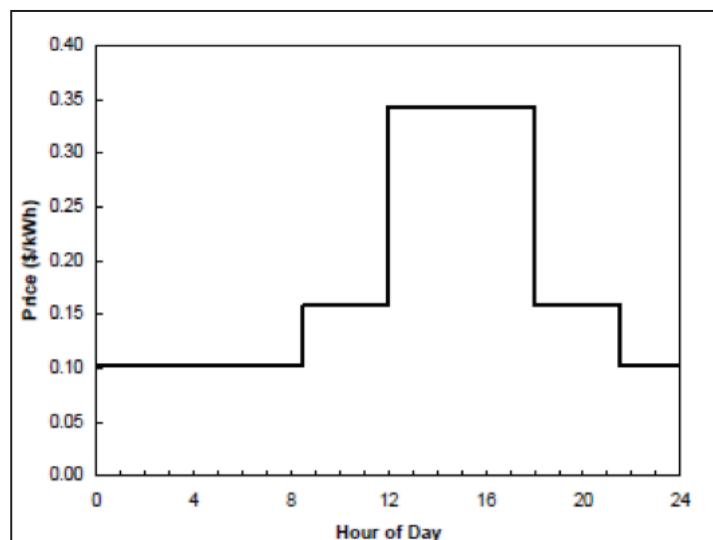


Figura 0-4: Ejemplo ilustrativo de variación de precios de la energía para un usuario final

b) Reducción del pago por capacidad

En muchos casos en la tarifa para el usuario final se incluye un cargo por capacidad o demanda, que tiene por objeto cubrir los costos necesarios para dotar al sistema de la capacidad necesaria para suministrar la demanda máxima. En el caso del usuario final conectado a la red de distribución este cargo incluye los costos de capacidad de los sistemas de generación, transmisión y distribución.

La forma en que se determinan y aplican los cargos por capacidad varía de un sistema a otro. En muchos casos se evalúan para un mes determinado, por lo que se expresan en \$ / kW al mes (\$ / kW-mes). Los cargos por capacidad se aplican en función de la demanda del usuario en horas de demanda pico del sistema, por lo tanto si se usa un almacenador para reducir la demanda neta durante las horas pico se puede reducir el cargo por capacidad.

3.2.12. Mejoramiento de la Confiabilidad del Sistema

El uso de almacenamiento para mejorar la confiabilidad del sistema tiene por objetivo suministrar energía a los usuarios cuando ocurren fallas o anomalías en el sistema que provocan la pérdida de suministro. En el caso de un corte de energía de corta duración el almacenador puede suplir la energía a los usuarios, sin embargo, en casos de fallas que afectan una gran parte del sistema durante un tiempo más prolongado, el almacenador se puede utilizar como medida de emergencia para facilitar el apagado o cierre ordenado de ciertos procesos, o bien servir de apoyo para arrancar generación local o activar otras medidas para atemperar los efectos de pérdida de energía. La duración de la descarga puede variar entre varios minutos a más de una hora, dependiendo del caso.

En ambos casos la energía almacenada debe ser con calidad suficiente como para garantizar la confiabilidad del servicio eléctrico. Esta aplicación es compatible con la mayoría de las aplicaciones descritas, especialmente el mejoramiento de la calidad de potencia.

3.2.13. Mejoramiento de la Calidad de Potencia o Producto Eléctrico

En este caso el almacenador se utiliza para proteger cargas, situadas aguas debajo del mismo, frente a eventos de corta duración que afectan a la calidad de la energía suministrada. Algunos ejemplos de mala calidad de la potencia, son los siguientes:

- Variaciones en la magnitud de la tensión (por ejemplo, los picos o caídas de tensión de corto plazo, subidas de más largo plazo, o huecos de tensión).
- Variaciones en la frecuencia nominal.
- Bajo factor de potencia.
- Armónicos (es decir, presencia de corrientes o tensiones a frecuencias distintas de la frecuencia nominal).
- Interrupciones en el servicio de cualquier duración, que van desde una fracción de segundo a varios minutos.

La tecnología de almacenamiento utilizada para aplicar en calidad del servicio debe producir una salida de potencia de alta calidad y no debe afectar negativamente a la red. La duración de la descarga necesaria para esta aplicación varía desde unos pocos segundos a aproximadamente un minuto.

3.2.14. Desplazamiento de Generación en el Tiempo – Time-Shift

El concepto de esta aplicación es muy similar a la descrita anteriormente como “cambio de uso en el tiempo”, solo que se trata específicamente del almacenamiento de generación de origen renovable, como por ejemplo generación eólica.

En este caso el almacenador se utiliza para almacenar energía procedente de una fuente renovable cuando la misma está disponible y el precio de la energía es bajo, para luego inyectarla al sistema en horas de demanda pico cuando el precio de la energía es más alto. **Figura 0-5** muestra un ejemplo ilustrativo de este aplicación. En este ejemplo, la planta eólica genera durante la noche. La misma es almacenada durante ese periodo y posteriormente inyectada a la red en las horas de pico. El resultado es de potencia constante durante las cinco horas de mayor demanda.

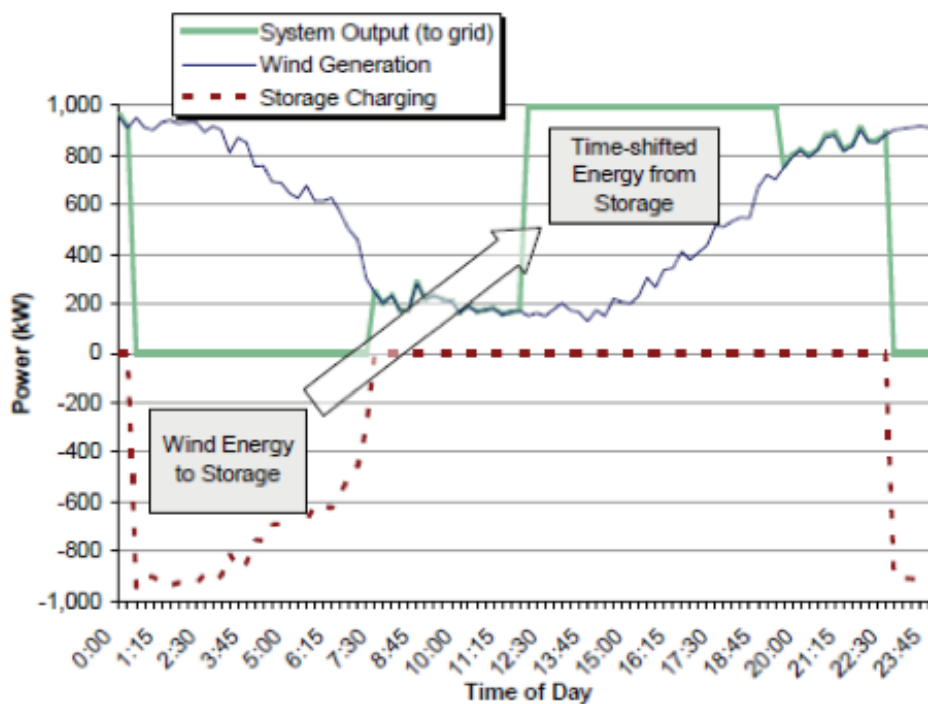


Figura 0-5: Uso de almacenamiento para desplazar generación eólica en el tiempo [2]

En este tipo de aplicación se requiere de almacenadores con una duración de descarga que varía entre media hora hasta cuatro horas, dependiendo de la cantidad de energía que es producida durante las horas fuera de pico. El almacenador puede estar situado cerca del sitio de emplazamiento del recurso renovable, en otras partes de la red o cerca de la demanda. Cuando los almacenadores se encuentran cerca de la generación renovable, en su ciclo de descarga, utilizan la red de transporte durante las horas de mayor consumo, produciendo una congestión innecesaria. Mientras que si los almacenadores se ubican cerca de la demanda,

en el ciclo de carga utilizan energía de bajo costo y realizan un aprovechamiento óptimo de las redes de transporte y descargan en la demanda, cuando el precio se encuentra en su valor máximo.

Las sinergias más importantes de esta aplicación incluyen adecuación de la capacidad firme de renovables y capacidad de suministro. Si los almacenadores se localizan en una ubicación central dentro de la red, también podrían utilizarse para regulación de frecuencia. Por otro lado, si los mismos están distribuidos, podrían utilizarse en aplicaciones tales como alivio de congestión y diferimiento de ampliaciones de transmisión y distribución.

3.2.15. Adecuación de capacidad firme de Renovables

La generación renovable de características variables y poco predecibles tales como la generación eólica y solar no puede proporcionar capacidad firme al sistema de la misma forma que lo hace la generación térmica convencional. Una alternativa para solucionar este impedimento es combinar la generación con almacenamiento de energía, de modo tal que la salida total de potencia del conjunto generación renovable-almacenador es controlable y constante durante el tiempo requerido.

Para este propósito, las condiciones de almacenamiento se pueden clasificar en de corta duración, y de ciclo diario. En la aplicación de corta duración el almacenador está destinado a cubrir las variaciones aleatorias de la generación renovable en una escala de tiempo que puede variar desde segundos a varios minutos. En el otro caso, el almacenador se diseña de tal modo de cubrir o "rellenar" las variaciones que ocurren durante un ciclo de 24 horas. En el caso de generación solar fotovoltaica el ciclo diario es claramente definido, sin embargo cierta generación eólica también presenta ciclos diarios bastante definidos.

Una de las dificultades y desafíos de proveer capacidad firme con renovables es que la potencia generada puede cambiar en amplitudes muy grandes en periodos muy cortos (rampas). Por ejemplo, la generación solar fotovoltaica puede variar de un máximo a un valor muy bajo si una nube pasa sobre la instalación. En el caso de la generación eólica, ráfagas de viento causan variaciones muy bruscas de la potencia de salida, pudiendo llegar a apagar toda la granja si la velocidad del viento supera la velocidad de corte de los aerogeneradores.

Los requerimientos de capacidad de carga y descarga para esta aplicación pueden variar significativamente dependiendo de las características de la aplicación. Por ejemplo, en el caso de solar fotovoltaica, puede variar entre media hora a dos horas, asumiendo que el ciclo de generación coincide con la demanda pico del sistema. En el caso de la generación eólica se necesitan tiempos de descargas mayores 3-4 horas.

El almacenamiento para esta aplicación tiene que ser altamente confiable, ya que la principal razón de la capacidad firme es proporcionar potencia constante cuando se requiera. Un generador que recibe remuneración por potencia firme puede verse sometido a severas penalidades si no cumple con lo requerido

3.2.16. Mejoramiento de la integración a la red

En la medida que incrementa la participación de generación renovable en un sistema eléctrico se acentúan

los problemas que este tipo de generación – variable y poco predecible – introducen en el funcionamiento y operación del sistema. Los distintos tipos de almacenadores de energía presentan en muchos casos una alternativa atractiva para mitigar estas deficiencias. El tipo de almacenador y las características técnicas que tienen que reunir en cada aplicación dependen del problema o situación a resolver. Las aplicaciones se clasifican de la siguiente forma:

1. Aplicaciones de corta duración: se distinguen dos subcategorías: 1.a) reducción de la variación de potencia de salida, 1.b) mejoramiento de la calidad de potencia.
2. Aplicaciones de larga duración: incluye tres subcategorías: 2.a) reducción de la variación de potencia de salida, 2.b) reducción de la congestión, y 2.c) adecuación a la demanda mínima.

1.a) reducción de la variación de potencia de salida de corta duración: El objetivo en este caso es usar almacenadores para reducir las variaciones de corta duración que experimenta la potencia de salida de la generación eólica o solar. Las duraciones de estas fluctuaciones varían entre algunos segundos a varios minutos.

Las fluctuaciones de potencia de salida desde el punto de vista del sistema en su conjunto dependen de cuán dispersa esté la generación renovable. En efecto, mientras más concentrada esté en una determinada área, mayor será la correlación que existe entre la potencias de salidas de las distintas plantas o granjas. Por otro lado, mientras más dispersa esté la generación geográficamente menor será la correlación entre sus potencias, y consecuentemente menor será la fluctuación total de potencia.

Los estudios demuestran que con almacenamiento de alrededor del 2% al 3% de la capacidad total de generación eólica suficientemente dispersa se puede reducir las fluctuaciones o volatilidad de salida significativamente. Esto aplica a niveles de inserción de alrededor del 10% en capacidad instalada.

1.b) mejoramiento de la calidad de potencia: El impacto de generación renovable en la calidad de potencia es un problema local que incluye: armónicos, flicker en la tensión, calidad del control de tensión, estabilidad de tensión, y malfuncionamiento de las protecciones. Se utilizan distintos tipos de almacenadores para mitigar estos efectos, principalmente baterías.

2.a) reducción de la variación de potencia de salida de larga duración: Esta aplicación está relacionada con la necesidad de compensar la variabilidad de la potencia de salida en periodos de tiempo comprendidos entre varios minutos a algunas horas. En un sistema eléctrico con generación convencional, el despacho y control de los generadores se programa de tal modo de seguir las variaciones horarias de la demanda, las cuales pueden predecirse con bastante exactitud. Cuando hay un porcentaje muy grande de generación variable y poco predecible, un cambio repentino o no revisto de esta generación puede ocasionar inconvenientes severos para el control del sistema, ya que el resto del parque de generación (generación convencional) tiene que adecuarse a tales cambios. Esto se identifica como “flexibilidad” del sistema para acomodar la generación variable. Cierta tipo de generación convencional tales como la generación hidráuli-

ca o las turbinas de gas pueden controlar su generación en rangos bastante amplios. Sin embargo, en otros casos, como por ejemplo grandes centrales de carbón o centrales nucleares, su producción es prácticamente constante (centrales de base) y no pueden arrancarse y pararse en forma frecuente.

El almacenamiento es una opción técnicamente viable para proveer al sistema de flexibilidad suficiente para acomodar generación variable sin causar deterioro de la confiabilidad y seguridad de la operación. Los requerimientos de capacidad de almacenamiento pueden variar grandemente de un sistema a otro, pero se estima que un rango de entre 4% a 6% de la capacidad total de generación renovable, para un nivel de penetración de alrededor del 10%, puede ser suficiente.

2.b) reducción de la congestión: En general no es económicamente conveniente reforzar el sistema de transmisión para poder evacuar la máxima potencia posible de la generación renovable, ya que el grado de utilización de la misma es generalmente bajo (entre 25% y 40%). Por tal motivo, en momentos de alta generación renovable se puede producir la congestión de ciertos corredores de transmisión, y como consecuencia de eso puede resultar necesario el vertimiento de generación renovable. Ciertos almacenadores de energía se pueden utilizar para reducir los problemas de congestión y por lo tanto mejorar el aprovechamiento de la generación renovable. Los almacenadores pueden instalarse aguas arriba del punto de congestión, almacenando energía cuando el flujo de potencia supera la capacidad de transmisión, y devolviéndola a la red en los periodos donde no hay congestión. El almacenador también podría ubicarse aguas debajo de la línea congestionada, en tal caso, el mismo se carga durante los periodos donde hay capacidad de transmisión disponible, y se descarga en los periodos de máxima transmisión reduciendo el flujo de potencia por la línea en cuestión.

2.c) adecuación a la demanda mínima: En algunos casos, la máxima potencia eólica ocurre en periodos de baja demanda donde la generación eólica más la generación de base no despachable supera la demanda del sistema. La generación de base no despachable es aquella que no puede reducirse o sacarse de servicio en forma frecuente (must-run), tal como la generación nuclear y las plantas térmicas de carbón. Cuando esto ocurre hay que recurrir al vertimiento de parte de la generación eólica, desperdiciando el recurso. Una alternativa técnicamente viable es usar almacenamiento.

Consideraciones técnicas y sinergias con otras aplicaciones.

Los almacenadores para reducir congestión no requieren de características operativas muy exigentes. Por otro lado, en el uso para reducir fluctuaciones de corta o larga duración se requiere que el almacenador tenga una capacidad de rampa de salida determinada, además de la capacidad de soportar muchos ciclos de carga y descarga.

Esta última aplicación en general no es apta para múltiples aplicaciones, no por las características técnicas, sino fundamentalmente por el hecho de que se requiere su uso en forma casi permanente, dejando poco margen para otra aplicación.

4. Valor Económico de Almacenadores de Energía - Costos Representativos y Beneficios

4.1. Costos Representativos de Almacenadores de Energía Introducción

Se presentan en esta sección costos representativos de distintos tipos de almacenadores de energía para uso en sistemas eléctricos.

Los valores presentados han sido extraídos de informes de costos elaborados por EPRI. Es importante destacar que es realmente muy difícil obtener datos representativos de costos de estos componentes, ya que en muchos casos se trata de instalaciones o incluso instalaciones piloto, por lo que no es posible hablar de costos estándar. EPRI ha trabajado en la elaboración de una base de datos de almacenadores de energía con valores consistentes de costos y de características técnicas [3][4]. Otra fuente de donde se pueden obtener valores estimados de costos de almacenadores es la base de datos del software de evaluación ES-Select™ desarrollado por el Sandia National Laboratory para el Departamento de Energía de Estados Unidos, que se describe en el capítulo 5 de este informe.

Los datos de costos se presentan en las siguientes tablas, extraídas y adaptadas de informes de EPRI. Dado que las características técnicas y operacionales, y por ende los costos de inversión, de almacenadores de energía son altamente dependientes del tipo de aplicación, estas tablas presentan valores característicos para básicamente los mismos tipos de tecnología pero en diferentes aplicaciones, de acuerdo al siguiente detalle:

- Tabla 0-1: Opciones de almacenamiento de energía para mejorar la Integración renovables y proveer servicios complementarios **(Fuente [3])**:
 - « Desplazamiento temporal de energía (time-shift).
 - « Capacidad de suministro.
 - « Seguimiento de la carga.
 - « Reserva de operación.
 - « Integración de renovables a la red de potencia.
- Tabla 0-2: Opciones de almacenamiento de energía para regulación de frecuencia y mejoramiento de la calidad de potencia **(Fuente [3])**:
 - « Regulación de frecuencia.
 - « Soporte de sistemas de transmisión.
 - « Reducción de la congestión en transmisión.
 - « Diferimiento de inversiones en transmisión y distribución.
- Tabla 0-3: Opciones de almacenamiento de energía para soporte de sistemas de transmisión y distribución **(Fuente [3])**:
 - « Desplazamiento temporal de energía (time-shift).
 - « Regulación de frecuencia.

- Tabla 04: Almacenadores pequeños distribuidos para sistemas de :
 - « Desplazamiento temporal de energía (peak shaving).
 - « Diferimiento de inversiones en distribución.
 - « Mejoramiento de la confiabilidad y calidad de potencia.

Algunas consideraciones importantes sobre los valores presentados en estas son las siguientes:

- Las cifras son rangos estimados para el costo de capital total instalada de sistemas reales. Se incluyen los costos de la interconexión electrónica de potencia, y todos los costos de instalación, transformador elevador, y la red a nivel de servicios públicos.
- Las estimaciones de costos y rendimientos presentados en estas tablas son valores promedio y han sido normalizados para producir una base de datos consistente. Los valores estimados no tienen la intención de aplicar a una empresa en particular en un lugar determinado, ya que la aplicación específica a una empresa puede variar sustancialmente, dependiendo del sitio. Las estimaciones fueron realizadas con valores del dólar de diciembre de 2010.
- En el desarrollo de estas estimaciones, se hizo un esfuerzo para evaluar los probables gastos de capital asociados con la implementación y la instalación de un proyecto de tecnología a escala comercial. Para cada aplicación, se elaboraron las estimaciones de costos de integración de instalación, interconexión y red.
- En los sistemas de almacenamiento de aire comprimido CAES son posibles tamaños entre 400 MW a 2.000 MW, con una duración de almacenamiento subterránea entre 20 a 30 horas. El costo incremental de 1 hora adicional de almacenamiento, una vez que la caverna se ha desarrollado, es de 1 U\$D – 5 U\$D/kW. Los datos mostrados son sólo para la potencia. Las Plantas CAES pueden necesitar fuentes de calor que provean 3,850 Btu / kWh; y los ratios de energía pueden variar entre 0,68-0,75. Se asume una caverna de almacenamiento para una geología típica, los costos para otras geologías pueden variar significativamente. Los costos de localización, permisos, estudios de impacto ambiental y evaluaciones geológicas no están incluidos.
- Baterías de plomo-ácido avanzada: Las estimaciones de costos se basan en el uso de baterías avanzadas de grado industrial de varios fabricantes. Los costos del ciclo de vida de la batería pueden variar considerablemente, en función del ciclo de trabajo base de diseño y vida útil. Los costos de sustitución de batería, se deben considerar como un gasto de O&M, variable en cualquier análisis del ciclo de vida. Los costos de capital se registran en un MWh “nominal” entregado por base del ciclo.
- Baterías de flujo: Los sistemas de baterías “redox” pueden ser diseñadas para una amplia gama de potencia y duración de almacenamiento de energía. Opciones tecnológicas para baterías “redox” de vanadio, Zn/Br, Fe/Cr y Zn/aire aún no han sido construidas para aplicaciones de gran potencia en la red (> 10 MW).
- En general para todas las tecnologías, los futuros costos del sistema van a ser más bajos después de que las primeras demostraciones sean probadas y validadas. Además con el tiempo, los productos se vuelven más estandarizados, y los costos de ingeniería iniciales se han eliminado.

Tecnología	Madurez	Capacidad (MWh)	Potencia (MW)	Duración (hrs)	Costo Total (\$/kW)	Costo (\$/kW-h)
Hidráulica de Bombeo	Maduro	1680-5300	280-530	6-10	2500-4300	420-430
		5400-14,000	900-1400	6-10	1500-2700	250-270
CT-CAES (en caverna)	Demo	1440-3600	180	8	960	120
				20	1150	60
Sodio-Sulfuroso (NaS)	Comercial	300	50	6	3100-3300	520-550
Plomo-ácido avanzado	Comercial	200	50	4	1700-1900	425-475
	Comercial	250	20-50	5	4600-4900	920-980
	Demo	400	100	4	2700	675
Vanadio Redox	Demo	250	50	5	3100-3700	620-740
Zn/Br Redox	Demo	250	50	5	1450-1750	290-350
Fe/Cr Redox	Investigación	250	50	5	1800-1900	360-380
Zn/air Redox	R&D	250	50	5	1440-1700	290-340

Tabla 0-1: Opciones de almacenamiento de energía para mejorar la Integración renovables y proveer servicios complementarios (Fuente [3])

Tecnología	Madurez	Capacidad (MWh)	Potencia (MW)	Duración (hrs)	Costo Total (\$/kW)	Costo (\$/kW-h)
Flywheel	Demo	5	20	0.25	1950-2200	7800-8800
Li-ion	Demo	0.25-25	1-100	0.25-1	1085-1550	4340-6200
Plomo ácido avanzado	Demo	0.25-50	1-100	0.25-1	950-1590	2770-3800

Tabla 0-2: Opciones de almacenamiento de energía para regulación de frecuencia y mejoramiento de la calidad de potencia (Fuente [3])

Tecnología	Madurez	Capacidad (MWh)	Potencia (MW)	Duración (hrs)	Costo Total (\$/kW)	Costo (\$/kW-h)
CAES (en caverna)	Demo	250	50	5	1950-2150	390-430
Plomo ácido avanzado	Demo	3.2-48	1-12	3.2-4	2000-4600	625-1150
Socio sulfuroso NaS	Comercial	7.2	1	7.2	3200-4000	445-555
Zn/Br Flow	Demo	5-50	1-10	5	1670-2015	340-1350
Vanadium Redox	Demo	4-40	1-10	4	3000-3310	750-830
Fe/Cr Flow	Investigación	4	1	4	1200-1600	300-400
Zn/air	Investigación	5.4	1	5.4	1750-1900	325-350
Li-ion	Demo	4-24	1-10	2-4	1800-4100	900-1700

Tabla 0-3: Opciones de almacenamiento de energía para soporte de sistemas de transmisión y distribución (Fuente [3])

Tecnología	Madurez	Capacidad (kWh)	Potencia (kW)	Duración (hrs)	Costo Total (\$/kW)	Costo (\$/kW-h)
Plomo-ácido avanzado	Demo- Comercial	100-250	25-50	2-5	1600- 3725	400-950
Zn/Br Flow	Demo	100	50	2	1450-3900	725-1950
Li-ion	Demo	25-50	25-50	1-4	2800-5600	950-3600

Tabla 0-4: Almacenadores pequeños distribuidos para sistemas de distribución

4.2. Beneficios Economicos de Almacenadores de Energía

4.2.1. Beneficios Económicos Derivados de Aplicaciones Simples

En esta sección se presenta un resumen sucinto de los potenciales beneficios económicos del uso de almacenadores de energía para las aplicaciones descriptas en el Capítulo 3.

En términos generales, los beneficios económicos de almacenadores de energía se presentan en las siguientes dos formas: 1) mediante un ingreso o ganancia adicional producida por la instalación, o 2) mediante el costo evitado por la instalación. Como ejemplos de la primera categoría se puede mencionar el pago recibido por la venta de energía, pagos por capacidad, pagos por servicio de regulación o la prestación de otros servicios auxiliares.

En cuanto a los costos evitados, estos se pueden presentar de diferentes formas: En primer lugar se tiene el caso en que la solución con almacenador de energía es la única opción viable, entonces el costo evitado es el costo que se incurriría si no se tomara ninguna acción, esto es; el costo de no hacer nada. La opción de no hacer nada se presenta en casos donde no existe una necesidad apremiante por adoptar una solución,

pero el hecho de tomar alguna acción puede representar un beneficio neto. Como ejemplo de esto se puede mencionar el costo evitado por reducción de las interrupciones del suministro, en caso que el almacenador se utilice para mejorar la confiabilidad y calidad de servicio eléctrico. En segundo lugar se tiene el caso en el que la solución con almacenador de energía es una opción más dentro de otras opciones, generalmente opciones basadas en tecnologías convencionales o estándar. En este caso el costo de evitado es el costo total de la opción estándar, incluyendo el costo de compra, instalación, operación y mantenimiento, y costo de desmantelamiento en caso que esto aplique. Por ejemplo, cierto tipo de almacenadores de energía puede utilizarse como solución temporaria para suministrar la demanda en horas de pico en ciertas áreas de carga, o bien ante contingencias en el sistema, y de esa forma diferir la necesidad de ampliaciones de las redes de transmisión y/o distribución. El costo evitado en este caso deriva de los beneficios financieros de aplazar en el tiempo las inversiones de ampliación de la red.

4.2.2. Beneficios Derivados de Aplicaciones Múltiples

En algunos casos la utilización de almacenadores de energía para cumplir un solo objetivo, por ejemplo proveer regulación de frecuencia, resulta económicamente conveniente y la inversión puede justificarse y recuperarse en un plazo aceptable. En otros casos sin embargo, resulta necesario utilizar una misma instalación de almacenamiento para más de un propósito para que la misma sea económicamente viable. Este es el concepto de aplicaciones múltiples que se trata en esta subsección.

Claramente, para poder hacer un aprovechamiento múltiple de una instalación, las distintas aplicaciones tienen que ser compatibles entre sí. Una combinación de aplicaciones es compatible si una misma instalación de almacenamiento se puede utilizar para todas las aplicaciones. A su vez, una combinación de aplicaciones es compatible si no existen conflictos operacionales ni técnicos entre las distintas aplicaciones o usos. Se describen a continuación ciertas condiciones básicas que se deben cumplir para que una instalación sea apta para usos múltiples, y para que además sea económicamente ventajosa. Se describen también los principales obstáculos o barreras que deben franquearse.

Los mayores beneficios se obtienen si existe cierto solapamiento entre las distintas aplicaciones en cuanto a la capacidad de energía, potencia o tiempo de carga/descarga. En efecto, si en una instalación se dedican porcentajes bien definidos de potencia a diferentes funciones (por ejemplo, 20% a capacidad de suministro y 80% a control de tensión), el valor total de la instalación no se ve incrementada, y prácticamente el mismo resultado puede obtenerse con dos instalaciones independientes más pequeñas. Lo que hace ventajoso el uso de una instalación mayor es precisamente la posibilidad de compartir la capacidad de la misma entre las distintas aplicaciones.

Conflictos o limitaciones técnicas: En algunos casos, los sistemas de almacenamiento no poseen las características técnicas necesarias para servir varias aplicaciones. Por ejemplo, un sistema de almacenamiento que no tolere muchas descargas profundas puede ser útil para diferir inversiones en transmisión, dado que en ese caso se utilizará en forma muy poco frecuente. Sin embargo, la misma no serviría para una aplicación de desplazamiento temporal del uso, donde se requiere de frecuentes cargas y descargas profundas. Otro

aspecto técnico importante que impone limitaciones a la posibilidad o aptitud para múltiples usos es la duración de descarga. En muchos casos esta característica se optimiza para cierto uso, y por tanto puede no resultar suficiente para otras aplicaciones.

Limitaciones operacionales: Esto se refiere a casos en que las distintas aplicaciones pueden competir entre sí por el uso del almacenamiento. Por ejemplo, si una instalación se utiliza para diferir expansiones de transmisión, la misma no puede utilizarse para mejoramiento de la confiabilidad.

Compatibilidad de beneficios entre los distintos beneficiarios: El uso de instalaciones de almacenamiento para múltiples usos puede implicar que los beneficios sean percibidos por distintos beneficiarios.

Ejemplos de aplicaciones múltiples:

Se presentan a continuación algunos ejemplos de usos múltiples, donde se identifican las sinergias que pueden presentarse entre las distintas aplicaciones. Estos son solo algunos ejemplos ilustrativos de las muchas posibles combinaciones de aplicaciones que podrían presentarse.

Desplazamiento temporal de energía y Capacidad de Suministro: Aunque existe una marcada distinción entre aplicaciones de almacenamiento para proveer capacidad y aplicaciones destinadas a proveer energía, puede existir una importante sinergia entre ellas si el uso de la energía y la necesidad de capacidad ocurren simultáneamente. Por ejemplo, si un usuario utiliza almacenamiento para desplazar su consumo y así reducir los cargos por potencia, tal utilización puede proveer capacidad al sistema si la reducción ocurre en horas de máxima demanda. Es decir hay una coincidencia temporal entre las dos aplicaciones, y por lo tanto se obtiene un doble beneficio.

Desplazamiento temporal de energía y diferimiento de expansión en transmisión y/o distribución: La aplicación de almacenadores para diferir inversiones en transmisión y distribución es compatible con otras aplicaciones. Un aspecto importante de esta aplicación, que la hace atractiva para combinarla con otras, es el hecho de que el uso de la energía y potencia almacenada es requerido solo unas pocas horas al año (desde algunas horas hasta un máximo de no más de 200 horas). Consecuentemente, la instalación puede utilizarse para otro propósito aproximadamente el 95% del tiempo. En este caso, la instalación se usará la mayor parte del tiempo para el desplazamiento temporal de uso. El aspecto más importante es que estas dos aplicaciones son compatibles y no hay interferencia o interacciones adversas entre las mismas. En efecto, en la mayoría de los casos los picos de demanda que someten a los sistemas de transmisión y distribución coinciden con los picos de demanda del sistema. Como consecuencia, resulta muy probable que la energía descargada cuando el almacenador está siendo usado como soporte de las redes de transmisión tenga un valor elevado, y por lo tanto sirva para el segundo uso.

Desplazamiento de generación renovable en el tiempo (integración de renovables) y desplazamiento temporal de energía: El uso de almacenadores para obtener un mejor aprovechamiento de la generación de renovables “desplazando” la generación en el tiempo es un concepto técnicamente simple y atractivo, sin

embargo en la mayoría de los casos no es económicamente justificable, debido al elevado costo de las instalaciones de almacenamiento. En efecto, almacenar energía renovable cuando el costo de la energía es bajo, o cuando hay limitaciones en el sistema para absorber esa energía, requiere de almacenadores de muy elevada capacidad, por lo que los beneficios asociados no resultan suficientes para superar el costo de inversión.

Para mejorar la rentabilidad si el almacenador se utiliza no solo para almacenar energía de una planta de generación renovable sino también para almacenar y vender energía de la red (desplazamiento temporal de energía). Por otro lado, si la instalación está convenientemente localizada podría utilizarse para otras aplicaciones como por ejemplo mejoramiento de la confiabilidad y calidad de servicio, manejo de la congestión y diferimiento de inversiones en transmisión y/o distribución. El uso efectivo para estas aplicaciones dependerá por supuesto de la ubicación del almacenador y de las características técnicas del mismo.

4.2.3. Beneficios para la Sociedad en General

En relación con los beneficios de almacenadores de energía descritos anteriormente se pueden identificar beneficiarios, que pueden ser los propietarios de las instalaciones, determinados clientes, la empresa eléctrica, etc. Es decir, tales beneficios económicos se puedan internalizar entre un grupo definido de beneficiarios.

No obstante esto, existen otros beneficios que impactan un grupo muy grande de beneficiarios, tales como todos los clientes de la empresa eléctrica, e incluso en algunos casos a toda la sociedad en general (bienestar social). Entre los beneficios se pueden citar los siguientes:

- Reducción de la cantidad de instalaciones necesarias para suplir a demanda de pico, lo incluye en uso de terrenos y recursos naturales.
- Aumento del grado de utilización de las instalaciones.
- Reducción de la dependencia de los combustibles fósiles: esto se logra como resultado de una mejor integración de renovables.
- Reducción de emisiones.
- Reducción de pérdidas en las redes de transmisión y distribución.
- Reducción de costos y mejora de la competitividad de empresas, debido al mejoramiento de la confiabilidad y calidad del servicio eléctrico.

La consideración de los beneficios sociales es muy importante a la hora de determinar la factibilidad y conveniencia económica del uso de almacenadores. Tal como se describió anteriormente, los beneficios económicos directos, o “internalizables” pueden no ser suficientes para justificar por sí mismos el costo de inversión de esta tecnología. Sin embargo la consideración de los importantes beneficios que impactan a un grupo muy amplio de la sociedad puede modificar esta perspectiva, favoreciendo la decisión del uso de almacenadores.

Este concepto es particularmente importante para reguladores, legislador y gobernantes, y debe ser tenido en cuenta a la hora de elaborar planes de desarrollo, incentivos y regulaciones sobre el uso y remuneración

de almacenadores. En efecto, en algunos casos resulta difícil identificar si un almacenadores es un componente del sistema de transmisión, o es parte de la generación, o ambos (considérese por ejemplo los casos de usos múltiples descritos anteriormente). Dado que las actividades de generación y transmisión siguen regulaciones completamente diferentes, resulta difícil encuadrar dentro de la regulación una instalación de almacenadores de energía que sirva para ambos propósitos.

5. Modelo para la estimación de beneficios de almacenadores

5.1. Introducción

Una evaluación precisa y completa de la factibilidad de aplicación, beneficios y costos de almacenadores de energía para una aplicación determinada requiere de un análisis técnico y económico exhaustivo y detallado, con modelos de simulación y cálculo apropiados. Asimismo, se necesita de una cantidad considerable de datos e información relativa a las condiciones de uso, parámetros operativos de la instalación y variables económicas. Sin embargo, no resulta práctico, y en muchos no es factible, realizar una evaluación tan detallada cuando el objetivo es hacer una estimación de posibles usos y beneficios de alternativas de almacenamiento de energía.

ES-Select™ es un software que tiene por objeto proveer un análisis estimativo de los potenciales usos y beneficios de diferentes tecnologías de almacenamiento. Consecuentemente, no requiere del ingreso de información detallada de la instalación y las condiciones de uso, sino que está diseñado para manejar la incertidumbre respecto a estos aspectos así como los costos y beneficios, y proporcionar resultados en rangos de variación razonables. Utiliza un procedimiento de Monte Carlo para elegir aleatoriamente cientos de posibles valores dentro de los rangos proporcionados para los datos y parámetros de entrada, asumiendo una distribución normal. En consecuencia, los resultados también se expresan en un rango de posibles valores mediante parámetros estadísticos apropiados.

La característica principal de ES-Select™ es la simplicidad de uso, la cual se prioriza frente a la exactitud de los resultados. El software está destinado a una primera evaluación de factibilidad de los posibles usos, beneficios y costos de instalaciones de almacenamiento, en etapas preliminares de estudio cuando la mayoría de los datos, características de la instalaciones y condiciones de operación son todavía desconocidas.

ES-Select™ es desarrollado por el Sandia National Laboratory para el Departamento de Energía de Estados Unidos. El software es de uso público y puede descargarse en el siguiente sitio web: <http://www.sandia.gov/ess/>

5.2. Estructura General del Modelo

Se presenta en esta sección una descripción sucinta de las funcionalidades del modelo ES-Select™. El lector interesado debe referirse al manual del usuario del software para obtener información detallada sobre las características del modelo y el modo de uso [6].

La Figura 0-1 muestra la estructura funcional del modelo. Lo primero que debe ingresarse como dato es la ubicación de la instalación que se desea analizar dentro del sistema eléctrico (generación, transmisión, distribución, demanda). Una vez ingresado ese dato se pasa a la página principal o *home page* desde donde se puede acceder a las distintas bases de datos y prestaciones del software, tales como:

- Base de datos de características técnicas de varias tecnologías de almacenadores.

- Base de datos de costos y potenciales beneficios de almacenadores.
- Comparación de tecnología en base a factibilidad técnica.
- Análisis económicos a través de una serie de indicadores económicos tales como: relación costo-beneficios, periodo de repago, tasa interna de retorno y flujo de fondos.
- Comparaciones gráficas para una mejor y más rápida visualización de los resultados.
- Análisis de aplicaciones múltiples, incluyendo: factibilidad de aplicación, compatibilidad de usos, beneficios económicos integrales.

Se describen a continuación las distintas partes y funcionalidades del modelo identificadas en la Figura 0-1.

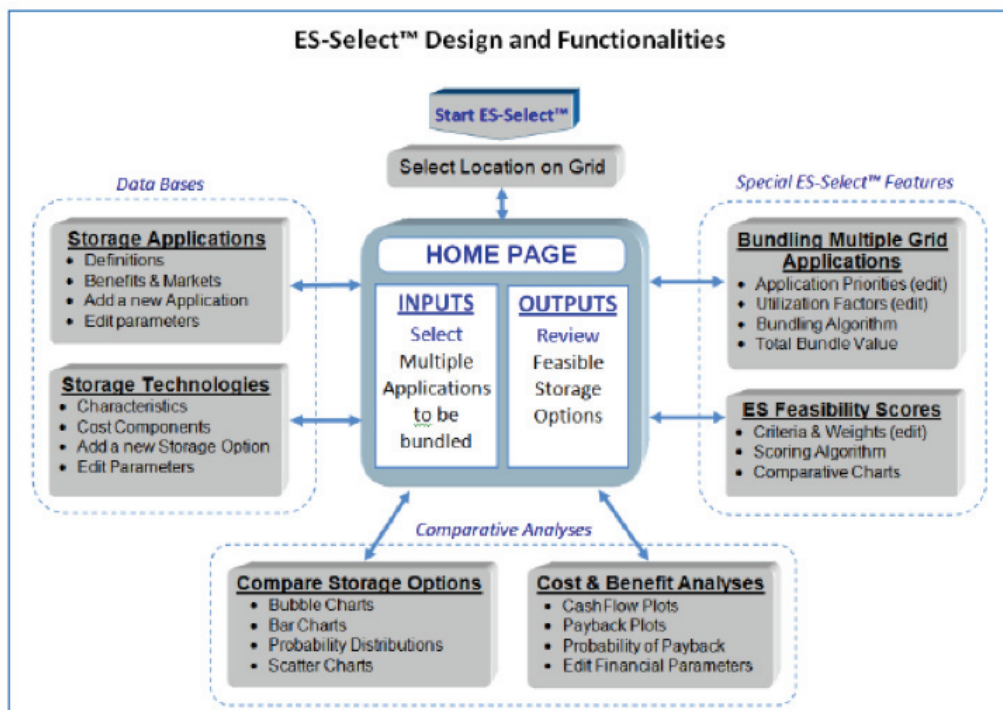


Figura 0-1: Estructura general del modelo para el análisis económico de almacenadores de energía ES-Select™

5.2.1. Selección de la Ubicación de la Instalación

El usuario selecciona la ubicación de la instalación de almacenamiento dentro del sistema, tal como se muestra en la figura siguiente. Este es un dato fundamental para el análisis técnico-económico, ya que la localización dentro del sistema define tres aspectos esenciales: el costo de la instalación, la factibilidad de utilizar distintas tecnologías de almacenamiento, y las posibles aplicaciones.

Por ejemplo, no es posible utilizar un almacenador de aire comprimido en caverna (CAES) para una instalación comercial o residencial. En el otro extremo del espectro del tipo de aplicaciones podríamos mencionar como ejemplo un almacenador térmico, que se utiliza en instalaciones pequeñas, no puede ser usado para proveer servicios a nivel del sistema de transmisión o generación. En otros casos la limitación no es técnica sino más bien operacional o de propiedad. Por ejemplo, un sistema de baterías que presta servicios en una

instalación industrial o comercial de gran tamaño, y que es operado y pertenece al dueño de tal instalación, si bien podría ser técnicamente apto para proveer servicio de arranque en negro a la red, no podría ser utilizado para tal efecto, a menos que exista un acuerdo específico con el propietario y la empresa de electricidad.

El modelo selecciona por defecto las restricciones de aplicación de tecnología de almacenadores para cada localización. Sin embargo, también da la posibilidad al usuario experto de cambiar estos datos por datos defecto, y adaptarlos a un caso en particular.

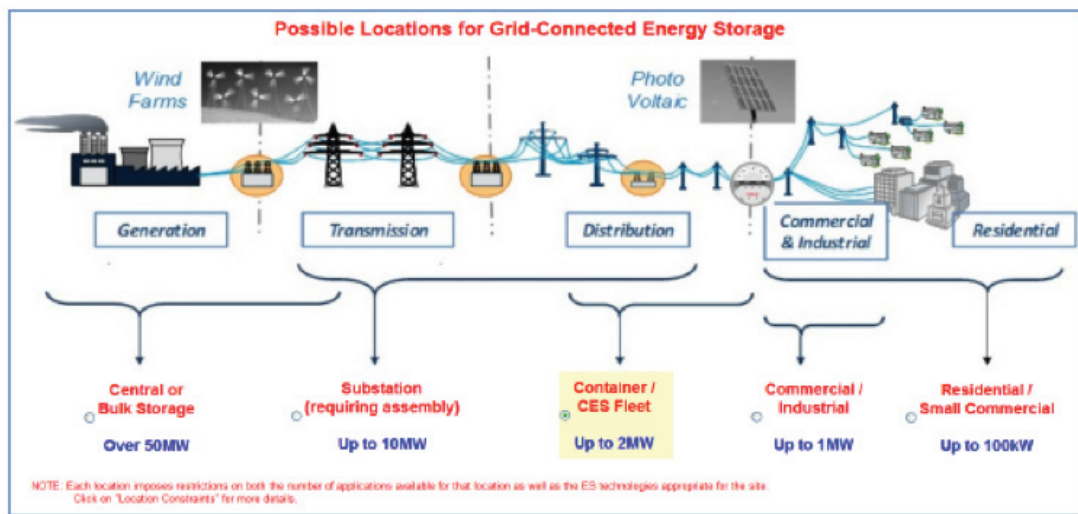


Figura 0-2: Hoja de ingreso de datos – Selección de la ubicación de la instalación [6]

Una vez seleccionada la ubicación se pasa a la interfaz principal. Tal como se muestra en la Figura 03, esta página está dividida en dos secciones. La sección de la izquierda es para ingreso de datos, INPUT, donde el usuario selecciona una o más aplicaciones, mientras que la mitad de la derecha es de resultados - OUTPUT. En esta se presentan las opciones de tecnologías de almacenamiento que son factibles para la localización y aplicaciones seleccionadas. Los resultados se presentan en forma de diagrama de barras para una mejor visualización e interpretación. El usuario puede seleccionar que la clasificación y ordenamiento de las opciones se haga en base a diferentes criterios, como por ejemplo, factibilidad técnica, grado de desarrollo de la tecnología (madurez), costo de instalación en base a capacidad \$/MW, costo de instalación en base energía \$/MWh, o duración de descarga.

En la parte inferior derecha de la sección de OUTPUT se encuentran tres botones de selección que conducen a otras páginas de resultados (output analysis) con resultados económicos (periodo de repago, flujo de fondos y tasa interna de retorno de la inversión), y otras comparaciones en base a características técnicas, costos y factibilidad de aplicaciones.

5.2.2. Base de datos de Tecnologías de Almacenadores

El programa contiene una base de datos de una importante variedad de tecnologías de almacenamiento. La versión actual (versión 2) incluye información detallada de 19 tipos o clases de almacenadores. Los datos

relativos a cada tipo de almacenador incluyen 47 ítems entre los cuales se encuentran los siguientes:

- Identificación.
- Velocidad de descarga.
- Densidad de energía y energía específica.
- Eficiencia.
- Tiempo de respuesta.
- Tamaño de la planta de la instalación (área ocupada).
- Vida útil.
- Costo estimado de instalación, operación y mantenimiento.
- Costo de equipos asociados.
- Costo de reemplazo.
- Madurez o grado de desarrollo.
- Factibilidad de aplicaciones y usos múltiples.

La información sobre cada una de estos ítems se presenta no como un único valor sino como un rango de variación, que en algunos casos resulta bastante amplio. La información contenida en esta base de datos ha sido obtenida a través de varias encuestas realizadas entre fabricante de equipos y ajustes en base a datos de instalaciones reales. El usuario puede acceder a esta base de datos e incluso modificar varios de los parámetros a conveniencia. Incluso se pueden agregar otros tipos de almacenadores.

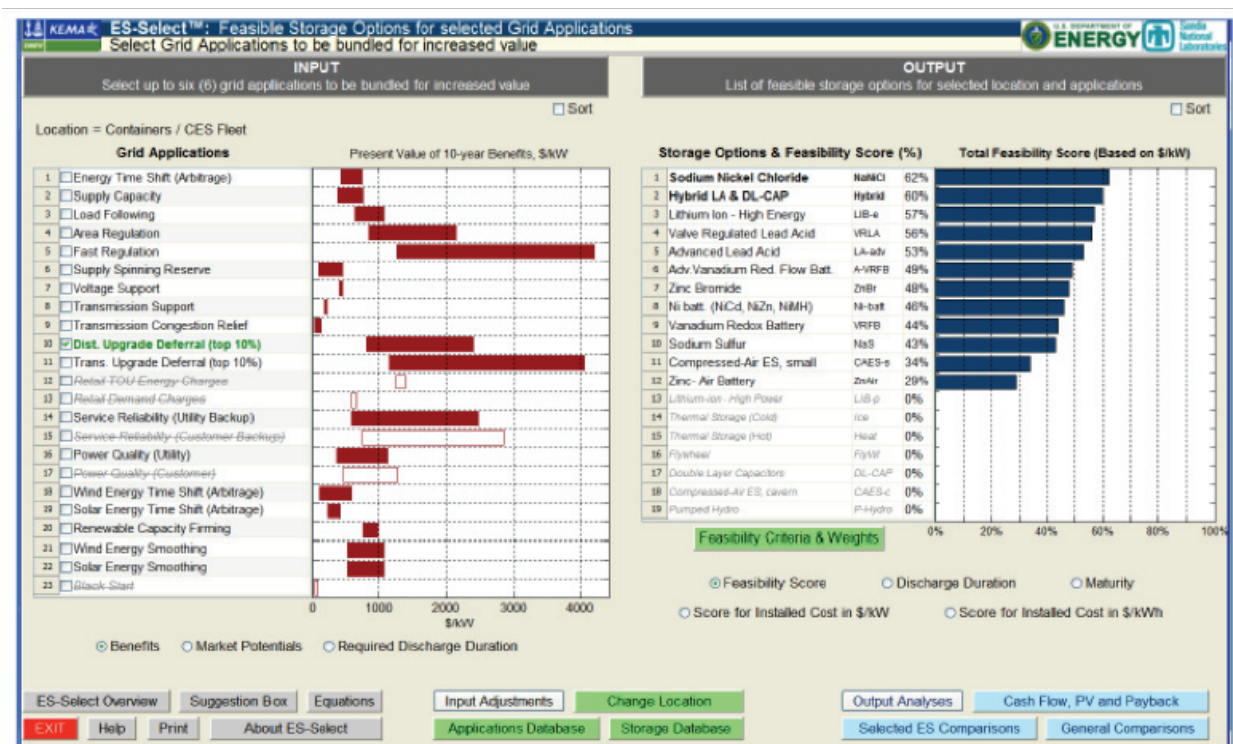


Figura 0-3: Página principal del modelo ES-Select™ - Selección de aplicaciones y visualización de opciones [6]

5.2.3. Base de datos de Aplicaciones

La base de datos de aplicaciones es accesible desde la página o interfaz principal. En la versión actual esta base contiene 23 diferentes aplicaciones de almacenadores, las cuales están divididas en 4 grupos de acuerdo al tiempo de descarga, y frecuencia de uso, según se describe en la Tabla 01. Cabe destacar que las características e identificación de las distintas aplicaciones en ES-Select™ difieren en alguna medida de la clasificación que se dio en el Capítulo 3 de este informe. Esto se debe a que por el momento no existe consenso en la industria respecto a esta clasificación. En este respecto, hay algunas iniciativas de colaboración entre algunas instituciones importantes del sector eléctrico en Estados Unidos - tales como EPRI, DOE, y Sandia - para elaborar una definición y clasificación unificada de aplicaciones de almacenamiento.

Grupo	Frecuencia de uso	Tiempo de descarga	Ejemplo
1	Alta	Alto	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de suministro • Mejoramiento de integración de renovables
2	Alta	Corto	<ul style="list-style-type: none"> • Regulación de frecuencia • Soporte de tensión
3	Baja (ocasional)	Alto	<ul style="list-style-type: none"> • Reserva de regulación • Congestión de transmisión • Diferimiento de inversiones en transmisión y distribución • Confiabilidad (back up)
4	Baja	Corto	<ul style="list-style-type: none"> • Mejoramiento de la calidad de potencia • Soporte de transmisión

Tabla 0-1: Grupos de aplicaciones en ES-Select™

Por cada aplicación, la base de datos contiene 25 ítems de información/datos, expresados como rangos posibles de variación, que intentan cubrir la mayoría de los posibles usos y tipo de mercado. La versión actual del software contiene información relativa al mercado y sistemas en Estados Unidos, sin embargo la base de datos puede modificarse para adaptarse a otros sistemas y mercados. Al igual que en la base de datos de tecnologías de almacenadores, el usuario tiene la posibilidad de agregar otras aplicaciones. Dentro de la información relativa a cada aplicación se encuentran los siguientes ítems:

- Tiempo carga/descarga requerido.
- **Beneficios anuales estimados.**
- Potencial de mercado estimado.
- Tiempo mínimo de respuesta requerido.
- Mínima cantidad de ciclos de descarga profunda (80% de la carga total).
- Grado de compatibilidad con otras aplicaciones.
- Aplicabilidad respecto a la localización en la red.

Estimación de beneficios:

Un aspecto importante a destacar es la forma en que el software determina los beneficios de las distintas aplicaciones. En realidad la estimación de los beneficios anuales específicos es un dato contenido en la base

de datos de aplicaciones. Tales beneficios específicos se expresan en la base de datos en \$/KW de capacidad instalada. El capítulo 5 del informe de Sandia [5] describe en detalle el proceso seguido para estimar los beneficios en cada tipo de aplicación. Estas estimaciones están basadas en una serie de hipótesis y suposiciones que intentan cubrir una gran variedad de posibles casos. Como en todos los datos e información en este software, las estimaciones de beneficios se presentan con un rango de variación, indicando los valores máximos y mínimos.

A modo de ejemplo se describe a continuación la forma en que se han estimado los beneficios relativos a la aplicación de diferimiento de expansión de las redes de transmisión y distribución.

El beneficio de diferir un año la construcción de una instalación de transmisión o distribución es valor financiero de aplazar tal instalación por un año, que incluye los costos de financiamiento, impuestos y seguros relativos a los bienes de capital involucrados. En este cálculo se asume que la capacidad de los almacenadores necesarios para aplazar las nuevas instalaciones en un año es el 30% de la capacidad nominal de tales instalaciones. Así por ejemplo, si las nuevas instalaciones tienen una capacidad nominal de 12 MVA (supóngase un nuevo transformador), la capacidad de almacenadores necesaria sería de $3\% \times 12 \text{ MVA} = 0.36 \text{ MVA}$.

El factor de 30% tiene por objeto ser representativo de una gran variedad de posibles condiciones. En realidad en algunos casos puede ser necesario una capacidad de almacenamiento del 1% de la nominal de las instalaciones que desplaza, mientras que en otros casos puede ser del 10%, dependiendo de la duración del pico de carga, incertidumbre sobre el crecimiento de la demanda en el tiempo, factor de seguridad adoptado, etc. El informe de la referencia [7] contiene mayor detalle y datos sobre el uso de almacenadores para diferir ampliaciones de T&D.

En este caso, el beneficio de aplazar inversiones en el tiempo se determina en base al costo de la instalación a ser diferida. Como se trata de un cálculo genérico que no está referido a una instalación en particular, se utiliza el concepto de costo marginal de ampliación, que es el valor de agregar un MVA (o MW dependiendo del caso) más de capacidad al sistema. El informe de referencia describe algunos valores de costos marginales de ampliación para Estados Unidos, por ejemplo menciona que el valor marginal promedio en el estado es de \$420 por kW de capacidad agregado, mientras que el valor máximo para ese estado ronda los \$662 / kW. El valor del beneficio por diferimiento anualizado se calcula en base al costo marginal. La base de datos incluye valores de estos beneficios que van desde \$155/kW hasta \$540/KW.

5.2.4. Análisis de Aplicaciones Múltiples

Tal como se describió anteriormente, una forma de incrementar el valor de una instalación de almacenamiento y hacerla más atractiva económicamente es utilizar misma instalación para varias aplicaciones diferentes.

El programa ES-Select™ realiza una estimación de los beneficios totales que se podrían obtener de la combinación de varias aplicaciones, en particular, de las aplicaciones que el usuario selecciona en la hoja

principal de datos. El valor total del beneficio de las aplicaciones seleccionadas se determina como la suma ponderada de los beneficios de cada aplicación, donde los factores de peso son los factores de utilización de cada aplicación, que representan la disponibilidad de la instalación para cada aplicación. Por ejemplo, el valor total para tres aplicaciones se determinará como:

$$\text{Beneficio total} = 100\% V1 + 50\% V2 + 75\% V3$$

Donde V1, V2 y V3 son los valores de cada aplicación y los porcentajes son los factores de utilización correspondientes. Por ejemplo para la aplicación V2, la instalación solo está disponible en promedio el 50% del tiempo. La Figura 04 ilustra este concepto. Es importante destacar que el factor de utilización de una aplicación de menor prioridad puede ser mayor que el factor de utilización de otra de las aplicaciones que tiene mayor prioridad, como es el caso de la aplicación V3 en este ejemplo genérico.

El programa permite al usuario definir el orden de prioridad de las aplicaciones seleccionadas. Al cambiar el orden de prioridad de las aplicaciones cambia el valor total del beneficio, ya que cambia la disponibilidad de la instalación para cada aplicación.

El programa determina los factores de utilización en base a la lista de prioridades definida por el usuario, y el tipo de aplicación, lo que a su vez define el grado de correlación con la demanda pico y el grado de disponibilidad de la instalación para diferentes usos.

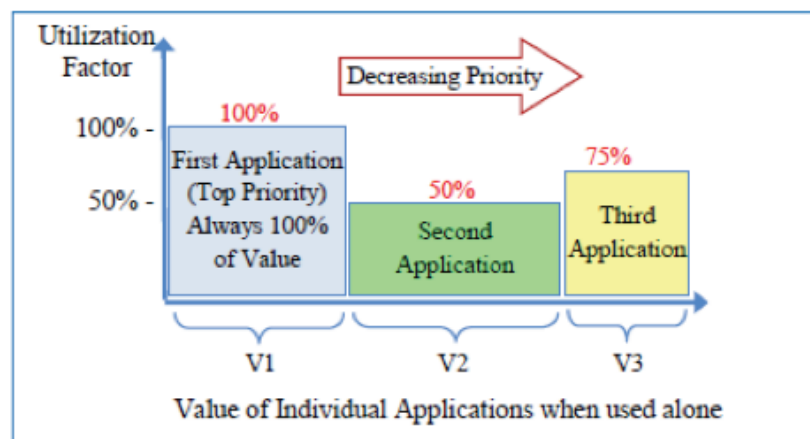


Figura 0-4: Ejemplo del valor de cada aplicación particular y su contribución al total

5.3. Ejemplo de Aplicación

Se presenta en esta sección un ejemplo simple que permite ilustrar el uso del modelo ES-Select™ y la interpretación de los resultados.

Caso #1: Uso simple

En este caso se quiere analizar el uso de almacenadores para diferir ampliaciones de sistemas de transmisión. Por lo tanto, en la hoja de localización se selecciona "Transmission". En la hoja de INPUT se selecciona

a la aplicación "Trans. Upgrade Deferral (top 10%)".

En la figura siguiente se muestra los resultados que indican la factibilidad de las distintas tecnologías para satisfacer la aplicación seleccionada, en este caso para diferimiento de inversiones en transmisión. El grafico de la derecha indica la factibilidad relativa al costo por kWh, mientras que de la izquierda indica la factibilidad total, que tiene en cuenta: la madurez o grado de desarrollo de la tecnología, adecuación para la localización considerada (considera disponibilidad, movilidad, tamaño, peso, escalabilidad, etc.), capacidad para cumplir con los requerimientos de la aplicación (tiempo de carga/descarga, ciclo de vida, eficiencia, etc.), y costo de instalación (en \$/KW o \$/KWh).

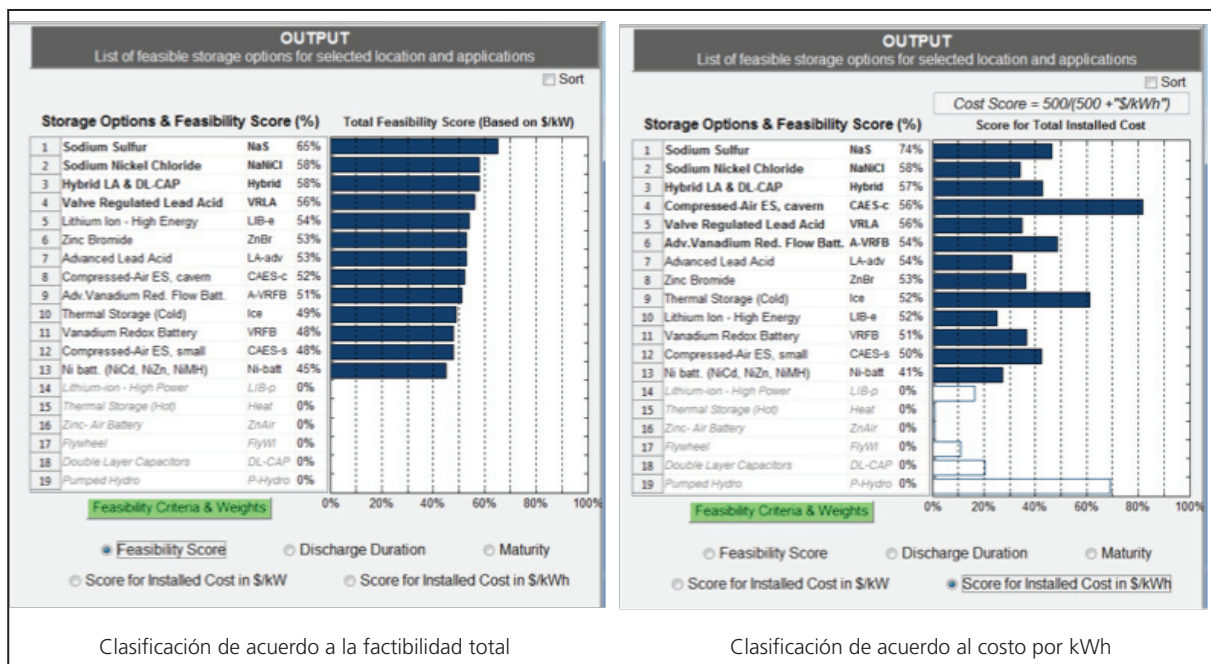


Figura 0-5: Factibilidad de las distintas tecnologías para la aplicación seleccionada – Caso #1

Se observa que la tecnología más apropiada para este tipo de aplicación son las baterías de sulfuro de sodio (NaS). Si bien el mejor costo por \$/KWh está dado por los almacenadores de aire comprimido en caverna, la posibilidad de aplicarlo donde realmente se necesita para dar soporte al sistema de transmisión es limitada, por lo que la factibilidad total es más baja que las baterías de NaS. Por otro lado, estas baterías presentan el mayor grado de desarrollo y madurez.

La Figura 06 muestra parte el resultado del análisis económico. Este grafico indica la probabilidad de que el repago se consolide en una cantidad de años determinada. Según este resultado, si bien la batería NaS es la más apta técnicamente para esta aplicación, resulta prácticamente imposible que la inversión pueda recuperarse en un periodo de años menor o igual a 20 años. Por otro lado, este resultado indica que una instalación de aire comprimido, si la misma fuera factible para este uso, tendría una probabilidad mayor del 85% de que el periodo de repago sea menor de 7 años. Otra opción apropiada puede ser la batería híbrida, la cual es técnicamente factible, aunque el rendimiento económico pueda ser bajo, de acuerdo a lo que in-

dica el grafico. En efecto, la probabilidad de que el repago se haga en menos de 15 años es menor al 75%. Los parámetros económicos y financieros usados en este caso son¹:

- tasa de descuento: 10%.
- Incremento anual del precio de la energía: 2.5%.
- Costo de la energía: entre \$30/MWh y 50 \$/MWh.
- Vida útil de la instalación: 20 años.

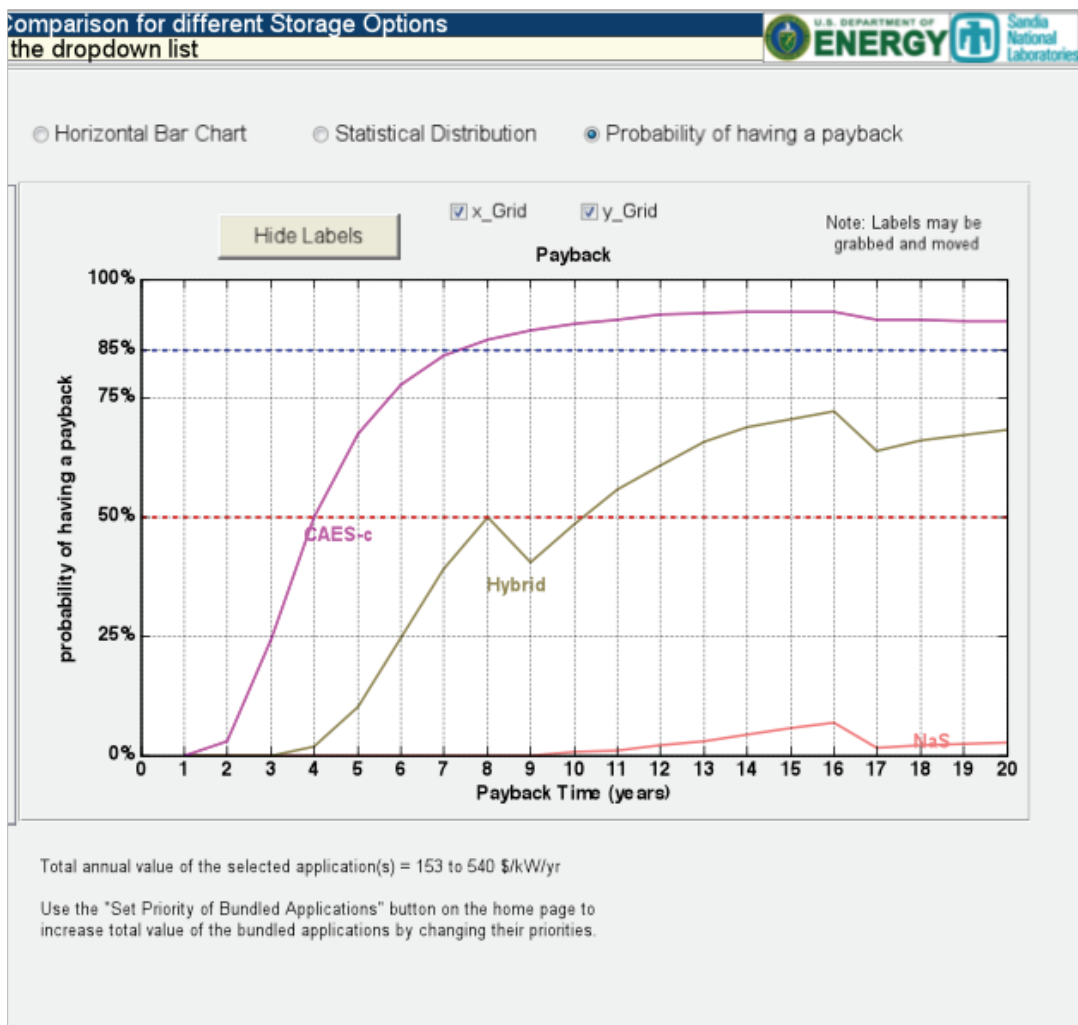


Figura 0-6: Probabilidad de repago en una cantidad de años determinada – Caso #1

Caso #2: Uso Múltiple

En ese caso se considera que la misma instalación puede ser utilizada para principalmente diferir expansiones del sistema de transmisión y para también para otros usos compatibles con este. Los usos considerados y el orden de prioridades son los siguientes:

¹Estos valores son solo indicativos para este ejemplo, no representan un caso en particular

Uso/Aplicación	Prioridad	Factor de utilización (%) mínimo	Factor de utilización (%) máximo
Diferimiento de transmisión	1	100	100
Capacidad de suministro	2	95	100
Regulación de frecuencia	3	75	83

La Figura 0-7 muestra la clasificación de las distintas opciones de almacenadores en función de la factibilidad total y del costo de instalación en \$/kWh. Los resultados son similares al caso anterior. Las tecnologías más factibles desde el punto de vista técnico para este uso combinado son las baterías de sodio sulfuroso (NaS), las baterías de cloruro de níquel sodio (NaNiCl) y las baterías híbridas. Desde el punto de vista de los costos de instalación la mejor opción es el almacenador de aire comprimido.

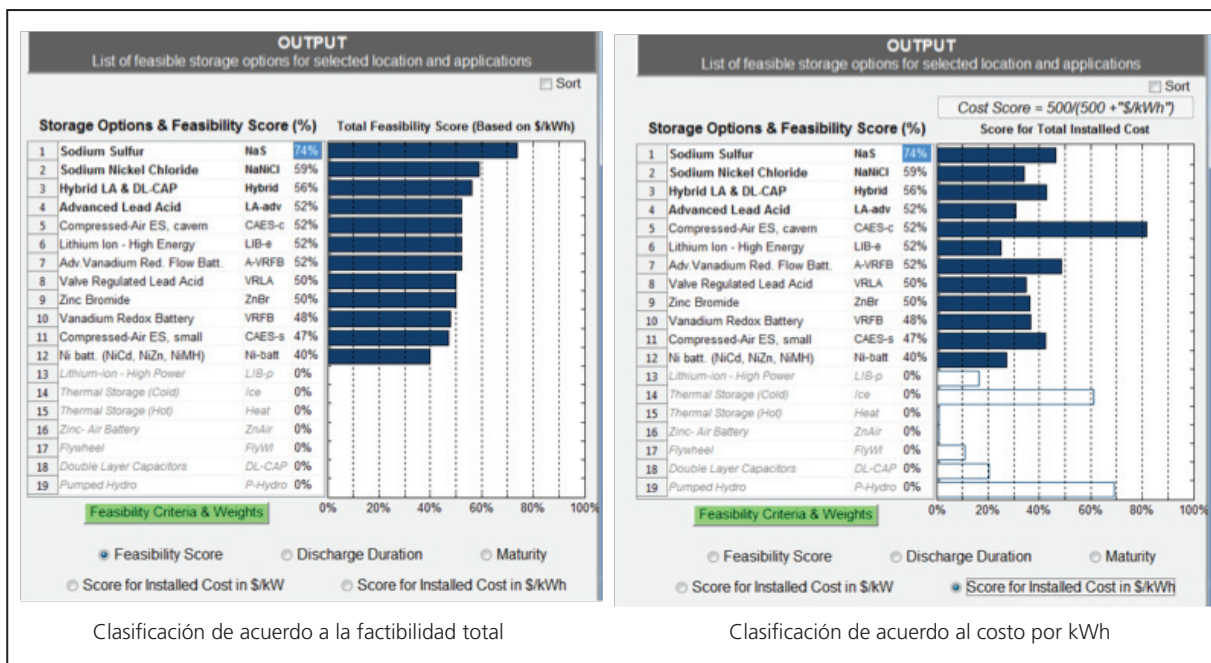


Figura 0-7: Factibilidad de las distintas tecnologías para la aplicación seleccionada – Caso #2

La Figura 08 muestra los resultados económicos para este caso, indicando la probabilidad de que el periodo de pago se consolide en un año determinado. La Figura 09 muestra la distribución estadística del periodo de repago de las diferentes tecnologías. Comparando con el caso anterior, se observa claramente que el hecho de utilizar la instalación para más de una aplicación mejora sustancialmente el desempeño económico de la inversión. Al igual que en caso anterior, el almacenamiento de aire comprimido presenta el menor periodo de repago, sin embargo su factibilidad de uso es más limitada. La batería híbrida resulta una opción atractiva con un periodo de repago de entre 5 y 7 años. La batería NaNiCl es la tercera opción, pero el periodo de repago es considerablemente mayor que para las otras tecnologías.

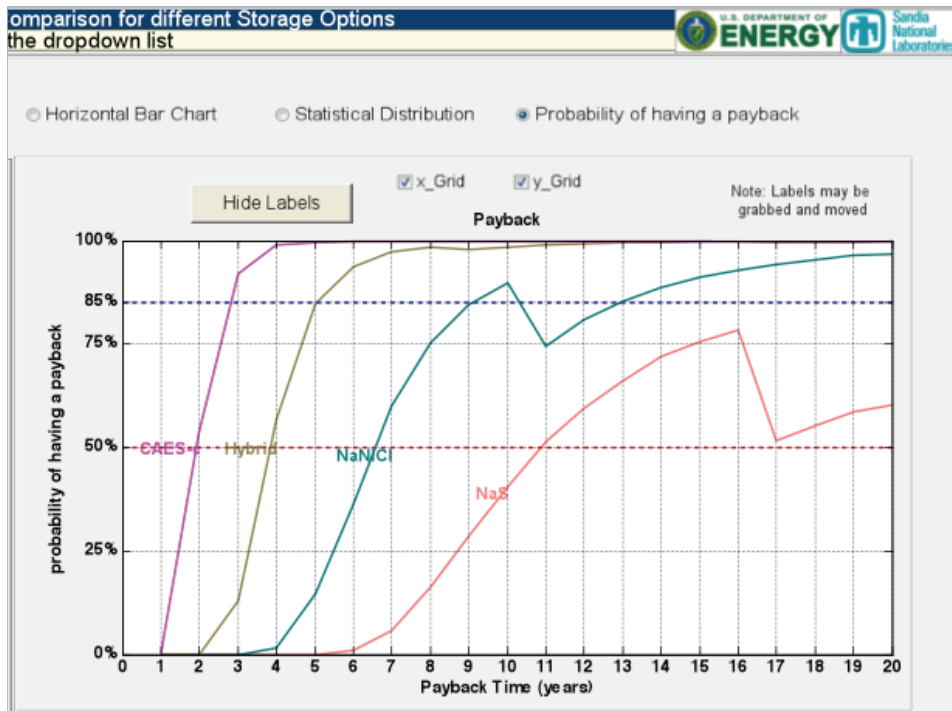


Figura 0-8: Probabilidad de repago en una cantidad de años determinada – Caso #2

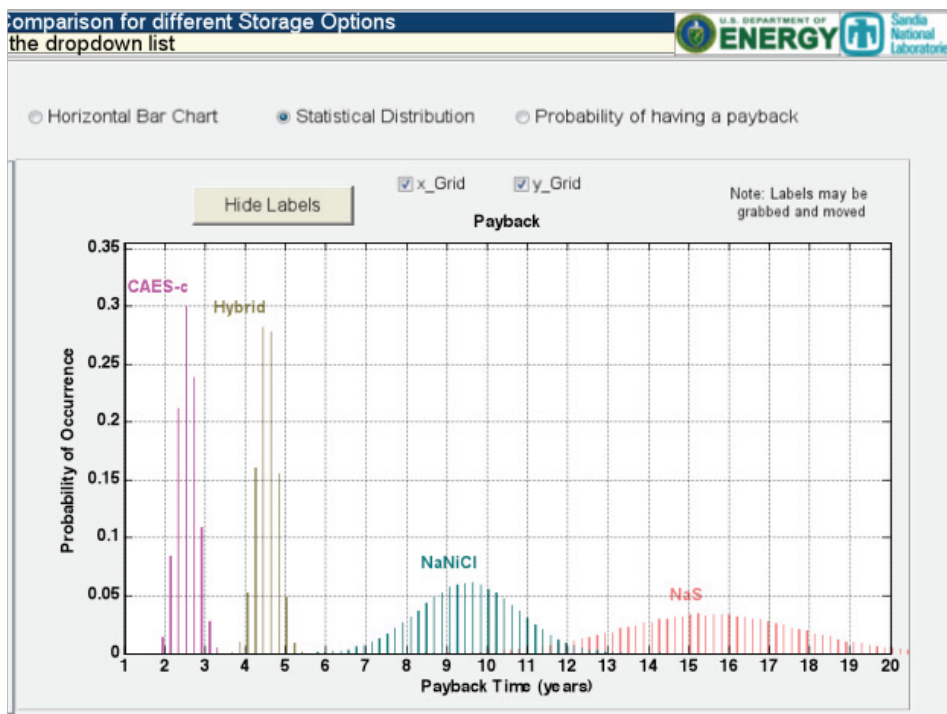


Figura 0-9: Distribución estadística del periodo de repago para diferentes tecnologías

6. Resumen y Conclusiones

Este informe tiene como objetivo analizar la utilización de almacenadores de energía como alternativas para resolver ciertos problemas de los sistemas eléctricos, así como mejorar la eficiencia de los mismos, especialmente frente a la necesidad de integrar cantidades crecientes de generación renovable variable.

Las siguientes son algunas de las principales conclusiones de este trabajo:

- Existe una variedad considerablemente amplia de tipos de almacenadores de energía que pueden utilizarse en sistemas eléctricos, en muy variadas aplicaciones. La utilización en la mayoría de los casos es técnicamente viable, el mayor impedimento para una utilización más masiva es el rendimiento económico, o dicho de otra forma, la relación costo-beneficio.
- Una instalación de almacenamiento es generalmente difícil de justificar económicamente si la misma está destinada a una sola aplicación. Sin embargo, si la misma instalación se puede usar para distintos usos, se pueden obtener beneficios muchos mayores que justifiquen la inversión. El uso múltiple de una instalación no es siempre posible. En efecto, las aplicaciones deben ser compatibles entre sí, y el almacenador debe cumplir con determinados requerimientos constructivos y operativos para que la aplicación múltiple sea factible.
- Cuando se describe el rendimiento económico de una instalación de almacenamiento generalmente se consideran beneficios económicos directos, es decir los beneficios puedan internalizarse entre un grupo definido de beneficiarios. No obstante esto, existen otros beneficios que impactan un grupo muy grande de beneficiarios, tales como todos los clientes de la empresa eléctrica, e incluso en algunos casos a toda la sociedad en general (bienestar social). Entre los beneficios se incluyen por ejemplo, la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles: esto se logra como resultado de una mejor integración de renovables, y la reducción de costos mejora la competitividad de empresas, debido al mejoramiento de la confiabilidad y calidad del servicio eléctrico.
- Los beneficios económicos directos pueden no ser suficientes para justificar por sí mismo el costo de inversión de esta tecnología. Sin embargo la consideración de los importantes beneficios que impactan a un grupo muy amplio de la sociedad puede modificar esta perspectiva, favoreciendo la decisión del uso de almacenadores. Por lo cual, los beneficios globales debieran ser considerados cuidadosamente a la hora de definir políticas de incentivos para el desarrollo y uso de almacenamiento de energía.

7. Bibliografía

Energy network infrastructure and the climate change challenge: report by Parsons Brinkerhoff to the Energy Networks Association (ENA), Australia.

EPRI-DOE Handbook of Energy Storage for Transmission and Distribution Applications, EPRI, Palo Alto, CA, and the U.S. Department of Energy, Washington, DC: 2003. 1001834.

Electric Energy Storage Technology Options: A White Paper Primer on Applications, Costs, and Benefits. EPRI, Palo Alto, CA, 2010. 1020676.

Electric Energy Storage Technology Options: A White Paper Primer on Applications, Costs, and Benefits. EPRI, Palo Alto, CA, 2010. 1020676.

Energy Storage for the Electricity Grid: Benefits and Market Potential Assessment Guide, SANDIA REPORT SAND2010-0815, February 2010.

ES-Select™ Documentation and User's Manual, Version number 2.0, Released December 31, 2012, Department of Energy, Sandia National Laboratories.

Estimating Electricity Storage Power Rating and Discharge Duration for Utility Transmission and Distribution Deferral, SANDIA REPORT SAND2005-7069, November 2005.

Golden Valley Electrical Association Battery Energy Storage System: Engineer-of-Record Report. EPRI, Palo Alto, CA: 2010. 1020639.

