

Sistemas de Almacenamiento de Energía a través de Baterías Ion-Li e Hidrógeno: Ventajas y desventajas

Roberto Uribe Romero
Comisión Federal de Electricidad
Dirección Corporativa de Ingeniería y
Proyectos de Infraestructura
CDMX, México
roberto.uribe@cfe.mx

Rogelio Torres Mota
Comisión Federal de Electricidad
Dirección Corporativa de Ingeniería y
Proyectos de Infraestructura
CDMX, México
rogelio.torres@cfe.mx

Yolanda Zeferino Abundis
Comisión Federal de Electricidad
Dirección Corporativa de Ingeniería y
Proyectos de Infraestructura
CDMX, México
yolanda.zeferino@cfe.mx

Resumen—Este artículo describen las tecnologías de almacenamiento a través de Baterías Ion-Li e Hidrogeno, luego se realiza una evaluación de las mismas. Los sistemas son alimentados por energías solar fotovoltaica. El caso de estudio muestra las diferencias principales y las implicaciones técnicas, económicas y ambientales.

Palabras clave — *fotovoltaico, sistemas de almacenamiento de energía, bancos de baterías, hidrógeno, celdas de combustible, electrólisis.*

I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la capacidad instalada de fuentes de generación renovable variable, así como la apertura de los mercados eléctricos, marcan como prioridad un aumento en la flexibilidad de los sistemas eléctricos, de ahí la importancia de las tecnologías para almacenar energía las cuales se observan con grandes avances en los últimos años, así como la reducción de sus costos de instalación y operación.

Los Sistemas de Almacenamiento de Energía (SAE) tienen como aplicaciones principales: integración de energía renovable, energía eléctrica para micro redes aisladas y diferimiento de la inversión en T&D (Transmisión y Distribución). Dependiendo de la tecnología, tienen la posibilidad de brindar una serie de productos y servicios que el Sistema Eléctrico Nacional (SEN) y el Mercado Eléctrico Mayorista requieren para aumentar su eficiencia y mejorar su operación.

La creciente capacidad instalada a partir de fuentes renovables en el país en los últimos años corresponde principalmente a las tecnologías solar fotovoltaica y eólica. A medida que México avanza en el camino de la transición energética, los SAE representan una opción técnica y económicamente factibles en sitios estratégicos para abordar problemas de suministro de energía con altos costos y permiten mayor incorporación de fuentes renovables al Sistema Eléctrico Nacional.

II. SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

A. Marco Regulatorio de los SAE en México

Los Sistemas de Almacenamiento de Energía (SAE) se encuentran mencionados e identificados en los siguientes instrumentos regulatorios y de Planeación que refieren a lo señalado en la Tabla 1.

TABLA 1

	<i>Documento</i>	<i>Contenido</i>
Definición	Manual de Costos de Oportunidad	Sistema capaz de almacenar una cantidad específica de energía para liberarla cuando se requiera en forma de energía eléctrica, el cual será registrado bajo la figura de Central Eléctrica
Participación en el MEM	Bases del Mercado	Se establece su forma general de participación en el Mercado: registrado como Central Eléctrica representado por un Generador
Registro y representación	Bases del Mercado	Se establece que “deberán registrarse bajo la figura de Centrales Eléctricas y deberán ser representados por un Generador”
Características Técnicas	Código de Red	Requerimientos de central asincrónica
Proyectos en estudio	PRODESEN 2016 y 2017	Bancos de Baterías en Baja California Sur (10 y 20 MW)
Productos y Servicios reconocidos	Anteproyecto 25 01 2019	Energía, Potencia, Reserva de Regulación Secundaria, Reserva Rodante, Reserva No Rodante, Reserva Operativa, Reservas Suplementarias, Reserva Reactiva, Potencia Reactiva, Arranque de emergencia y conexión a bus muerto, Operación en isla y Servicios regulados de transmisión y distribución al diferir o reemplazar inversión.

B. Aplicaciones SAE

Las aplicaciones de los SAE dentro de la cadena de suministro de energía eléctrica van desde la Generación, Transmisión, Distribución y hasta el usuario final. Las tecnologías por su parte abarcan ciertos rangos de acuerdo con la capacidad del sistema y duración (Figura 1). Las tecnologías que pueden manejar mayor capacidad y duración diferentes a la más empleada y bien conocida del rebompeo hidráulico son las Baterías y el Hidrógeno (Figura 1).

Las tecnologías más comerciales son las Baterías (Ion-Li) y el Hidrógeno, éste último con un gran desarrollo tecnológico.

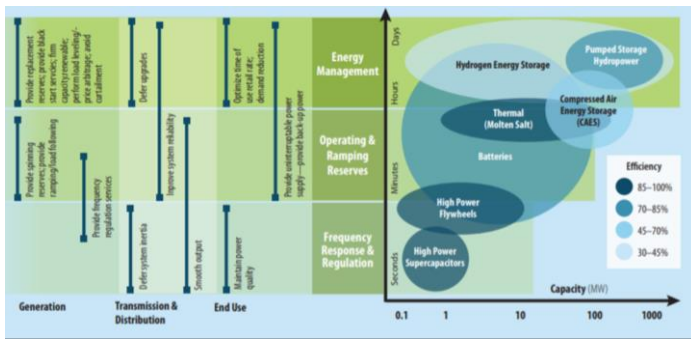


Figura 1. Características y Aplicaciones de los SAE
Fuente: National Renewable Energy Laboratory, 2016

III. TECNOLOGÍAS

Las tecnologías de almacenamiento que emplearemos en el presente caso de estudio van asociados a un sistema fotovoltaico el cual representa la fuente de alimentación. A continuación, se describen las tecnologías de Baterías Ion-Li, Hidrógeno y Fotovoltaico.

A. Baterías Ion-Li

En los últimos dos años, la tecnología de baterías Ion-Li ha crecido rápidamente para aplicaciones de almacenamiento estacionario. Los tipos más comunes de celdas de iones de litio líquidos son las celdas cilíndricas y prismáticas (en computadoras portátiles y otras aplicaciones). En comparación con las baterías de plomo-ácido, la tecnología de iones de litio es relativamente nueva. Hay muchas químicas de iones de litio diferentes, cada una con características específicas de potencia y energía.

Una celda de batería de iones de litio contiene dos materiales reactivos que generan una reacción química de transferencia de electrones. Para experimentar la reacción, los materiales deben contactarse eléctricamente entre sí, ya sea directamente o a través de un cable, y deben ser capaces de intercambiar iones cargados para mantener la neutralidad de carga general a medida que se transfieren los electrones. Una celda de batería está diseñada para evitar que los materiales entren en contacto directo entre sí y para conectar cada material a una terminal eléctrica aislada del otro material, siendo las terminales los contactos externos de la celda.

Dentro de la celda, están conectados por un electrolito que puede conducir iones, pero no electrones, esto se logra construyendo la celda con una membrana aislante porosa, llamada separador, entre los dos materiales y llenando esa membrana con una solución de sal iónicamente conductora. Por tanto, este electrolito puede servir como camino para los iones. Cuando los terminales externos de la batería están conectados entre sí a través de una carga, los electrones tienen un camino entre los materiales reactivos y la reacción química cuenta con una diferencia de potencial (Figura 2).

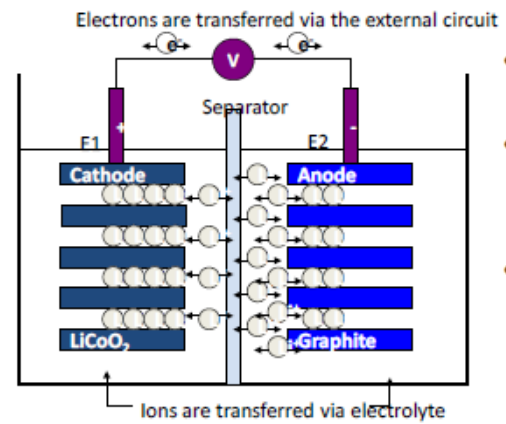


Figura 2. Principales componentes
Fuente: Energy storage handbook.

B. Hidrógeno

La principal forma de producción de hidrógeno es por electrólisis, que consiste básicamente en la disociación de las moléculas de agua en hidrógeno diatómico (H_2) y oxígeno (O), utilizando energía eléctrica como agente separador. Cuando se reverte el proceso de electrólisis, es decir cuando se une el hidrógeno libre con oxígeno, se forma agua y como subproducto electricidad, este proceso se realiza en las llamadas celdas de combustible; con potencias que van desde Watts (W) hasta MW.

Una pila de combustible es un dispositivo que convierte la energía química de un combustible rico en hidrógeno en energía eléctrica y calor útil de alta calidad, en un proceso electroquímico a temperatura constante. La eficiencia de la energía en dichas celdas es extremadamente alta (Figura 3).

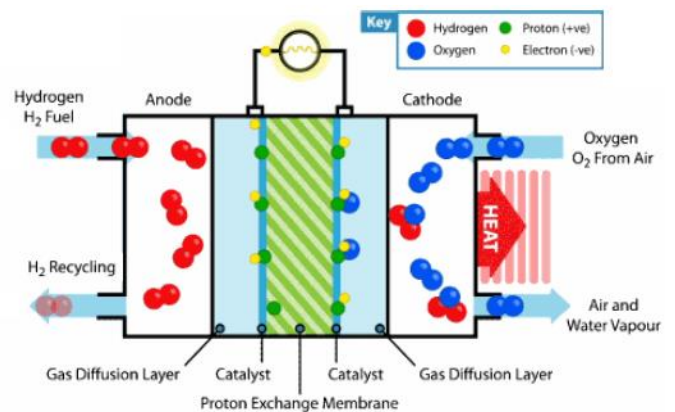


Figura 3. Pila de combustible.
Fuente: <https://hidrogeno18.wixsite.com/>

Existen seis tipos de celdas de combustible, agrupadas por capacidad, con potencias de hasta 100 kW: Polímero sólido (PEM), Combustible microbiana (CCM) y Celdas alcalinas (AFC), mayores a 100 kW: Óxido sólido (SOFC), mayores a 10 MW: Ácido Fosfórico (PAFC), y con capacidad de 100 MW: Carbonato fundido (MCFC). Con potencias de hasta 100 kW; la eficiencia eléctrica de las pilas va de 30% - 60% en la pila (CCM, PEM, PAFC y MCFC) y mayores a 60% (AFC, SOFC). Las aplicaciones principales son vehículos de

transporte (AFC, PEM), residenciales y comerciales (PAFC), telecomunicaciones y cogeneración (MCFC y SOFC). Las tecnologías utilizadas a gran escala son las pilas MCFC y SOFC.

C. Aprovechamiento del recurso solar

La tecnología fotovoltaica ha sido la de mayor crecimiento en capacidad instalada en el país seguida de la tecnología eólica, siendo la primera la más utilizada debido a su modularidad, competitividad en el costo y disponibilidad del recurso en prácticamente todo el país.

En México las condiciones para aprovechar la energía solar de acuerdo a las bases de datos como: Meteonorm 7.3, NASA-SSE, NREL NSRDB, PVGIS TMY se tiene como promedio de las entidades federativas una irradiación media anual de 5.5 kWh/m²/día. Sin embargo, se cuenta regiones en el país con una irradiación promedio superior a 6.25 kWh/m²/día. Otra fuente de referencia es el Atlas nacional de Zonas con alto potencial de Energías Limpia que identifica las zonas de mayor portencial (Figura 4).

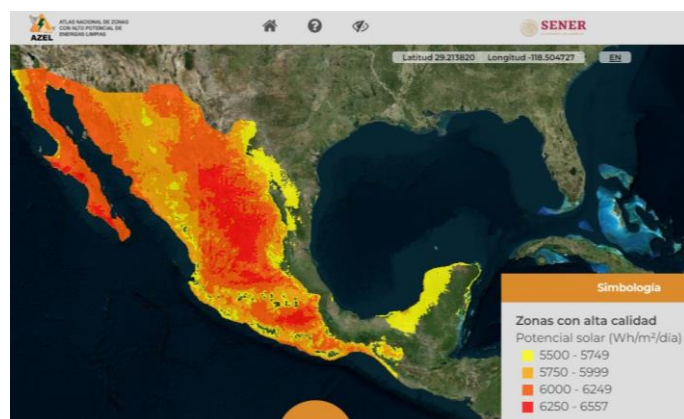


Figura 4. Atlas nacional de Zonas con alto potencial de Energías Limpia
Fuente: <https://dgel.energia.gob.mx/azel/>

Como mencionamos el costo de la tecnología ha tenido un impacto positivo para el desarrollo e implementación de proyectos en México y a nivel mundial.

La nota Técnica del Departamento de Infraestructura y Energía del Banco Interamericano de Desarrollo referente a la Evolución futura de los costos de las energías renovables y almacenamiento en América Latina se puede identificar que para el año 2020 el costo paramétrico de una central fotovoltaica es de \$700 USD/kW. México muestra costos de inversión de la tecnología fotovoltaica inferiores al promedio global, se estima que para 2030 el costo unitario sea de \$500 USD/kW (Figura 5).

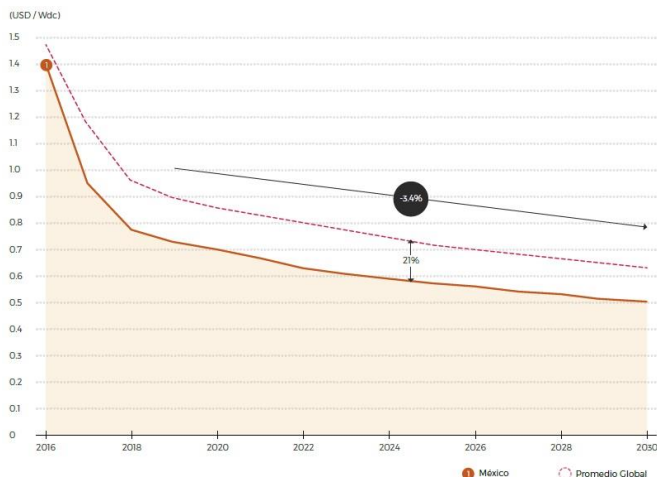


Figura 5. Estimación de CAPEX Solar FV 2019-2030
Fuente: Wood Mackenzie

D. Hidrógeno a partir de energías renovables

El hidrógeno verde es el que se obtiene a partir de energías renovables como la solar, eólica, hidráulica, geotérmica y biomasa, nucleares o fósiles; además de que puede ayudar a descarbonizar algunos sectores como el de transporte, el hidrógeno puede ser el medio a través del cual se lograría la integración de las energías renovables en el sistema eléctrico nacional, debido a la capacidad de almacenamiento de electricidad de días, semanas o meses.

Cuando se dispone de energía eléctrica y ésta no será enviada a la red eléctrica para ser consumida por la demanda, puede almacenarse, este concepto se conoce como Potencia eléctrica a gas (Power to gas o Energía a Combustible); la energía eléctrica excedente de la generación de energía limpia es transformada en hidrógeno, éste se almacena y utiliza posteriormente para generar energía eléctrica, o en alguna otra actividad económica, cambiando la estructura energética. El equilibrio entre suministro y demanda de electricidad es un desafío que aumenta cuando se utilizan energías renovables, debido al grado de intermitencia que implica su uso.

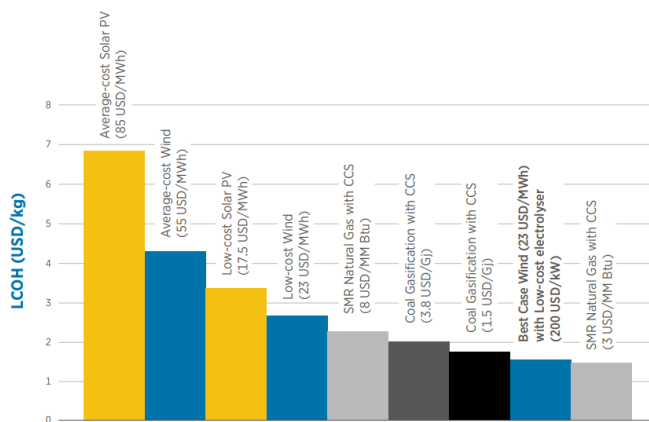


Figura 6. Costos de producción de hidrógeno a partir de energías renovables.
Fuente: IRENA, 2019.

IV. APLICACIONES EN EL MUNDO

A. Baterías Ion-Li

Los SAE a través de Baterías (Ion-Li principalmente) cuentan con una capacidad a nivel mundial de 12 573 MW distribuidos en proyectos anunciados (6002 MW), contratados (1957 MW), en operación (3677 MW) y en construcción (938) al cierre del 2019. Los países con mayor capacidad de proyectos se encuentran: Estados Unidos, Reino Unido, Australia, Japón, China, Corea del Sur, Alemania, Francia. En América Latina la participación con éste tipo de proyectos ha sido en Brasil y Chile.

Las empresas integradoras con mayor capacidad de proyectos a nivel mundial se encuentran: Fluence (SIEMENS), Tesla, RES, NEC ES, Wärtsila, BDY, Nidec ASI, LG CNS, Hyundai, Yunicos LSIS, GE, ABB NGK y Songrow.

Algunos de los sistemas que podemos resaltar son los siguientes, de manera resumida mencionamos: ubicación, capacidad, empresa desarrolladora y aplicación.

- California, USA, 100MW / 400MWh. SIEMENS. Servicios de capacidad, gestión de picos y servicios auxiliares. El más grande proyecto contratado entrará en operación en 2020.
- Arizona, USA, 2MW / 8MWh. SIEMENS. Diferimiento en la Transmisión
- Isla Ventotene, Italia, 0.5MW / 0.6 MWh. SIEMENS. Microredes.
- Santo Domingo, República Dominicana, 10MW / 10MWh. SIEMENS. Regulación de frecuencia.
- Ballarat, VIC, Australia, 30MW / 30MWh. SIEMENS. Servicios de capacidad, gestión de picos y servicios auxiliares.
- Sistema Solar + SAE. Lawai, isla de Kauai, 28 MWp / 100 MWh. SIEMENS. En operación 2019.
- Sistema Solar + SAE. Lawai, isla de Kauai, 13MWp / 52MWh. TESLA. En operación 2017.
- Sistema Solar + SAE. Norwich, CT, 15MWp / 6MWh. TESLA. En operación 2016.
- Sistema Solar + SAE. Isla Ta'u, American Samoa, 1.4MWp / 6MWh. TESLA. En operación 2016.

Un aspecto importante para la implementación de proyectos ha sido la caída de los costos de inversión de los sistemas que para 2020 tenemos 304 USD/kWh (Figura 7).

Capital costs for a fully-installed usable 20MW/80MWh AC energy storage system at beginning of life

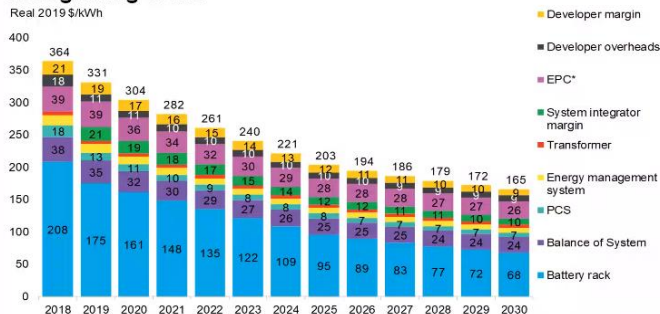


Figura 7. Costos de inversión Baterías

Fuente: Energy Storage Systems Costs Survey 2019, BloombergNEF

B. Hidrógeno

Se tienen las siguientes implementaciones asociadas al uso de generación de energía eléctrica y servicios a la red. De igual manera, se menciona: ubicación, capacidad, empresa desarrolladora y aplicación

- Alemania, 2MW, Falkenhagen la empresa convierte el exceso de energía eólica en hidrógeno.
 - Países Bajos. 20 MW. Generación de hidrógeno para la producción de combustibles.
 - Noruega. 20 MW. Combustible a partir de hidrógeno.
 - Reino Unido, 0.5MW, hidrógeno a partir de energía mareomotriz.
 - Austria. SIEMENS. 6 MW. Generación de hidrógeno.
 - SIEMENS, 6MW sistemas de generación de hidrógeno a partir de energía eólica.
 - México, INEEL, producción de hidrógeno a partir de un sistema fotovoltaico, 1m³ H₂/hora, 2003.
 - Japón, 10 MW, planta P2G, Toshiba Corp. y Tohoku Electric Power.
 - Vancouver, Canadá. 20 MW. Hidrógeno para enriquecer el gas natural.
 - Pilbara, Australia. 30 MW. Generación de energía eléctrica con hidrógeno.
 - Francia. 500 MW. Generación de hidrógeno para combustibles, fertilizantes y para la red de gas natural.
- Sin embargo, se cuenta con aplicaciones importantes en vehículos, trenes y barcos.

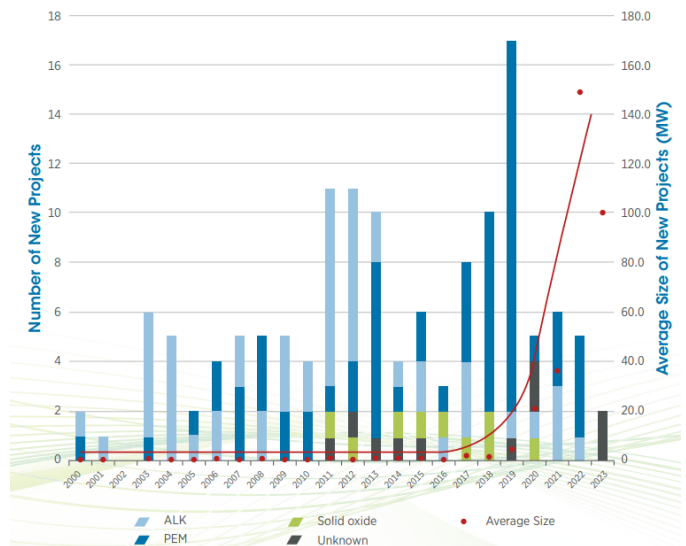


Figura 8. Proyectos Potencia eléctrica a Gas y escala de generación.

Fuente: Quarton and Samatli, 2018.

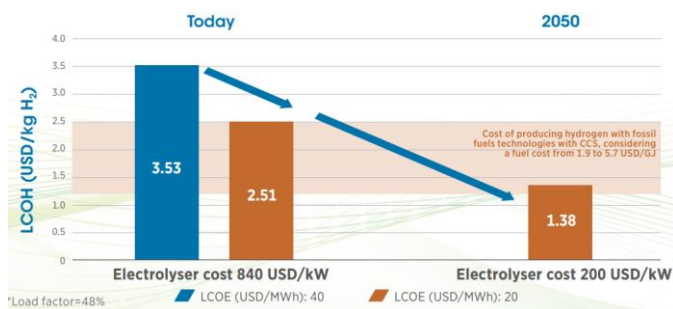


Figura 9. Costos de inversión Hidrógeno.
Fuente: IRENA, 2018a.

V. COMPARACIÓN DE TECNOLOGÍAS

Se ha estudiado la implementación de un Sistema Fotovoltaico (SFV) asociado al almacenamiento de energía a través de Baterías Ion-Li e Hidrógeno en una región del país con altos costos de producción de generación de energía eléctrica.

A. SFV + Baterías Ion-Li

El sistema propuesto tiene una capacidad instalada de 25 MWac sin embargo, solo 12.5 MW se entregarán de manera directa a la red y el resto se destinará al almacenamiento de la energía para su entrega en las horas más convenientes al sistema de acuerdo al diagrama de la Figura 10.

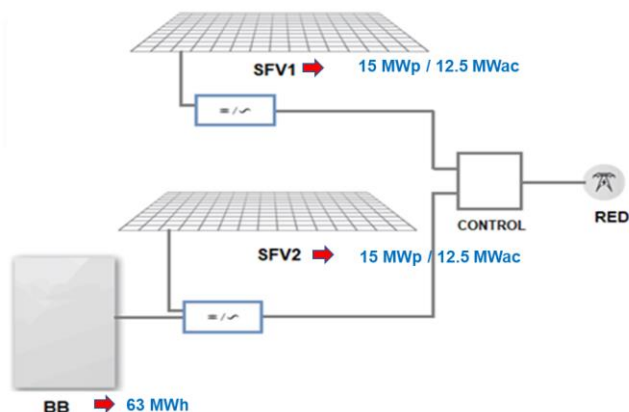


Figura 10. Diagrama esquemático SFV + Baterías

B. SFV + Hidrógeno

El sistema híbrido consiste en la generación de energía eléctrica, generación de hidrógeno y generación de energía eléctrica con hidrógeno. Se considera la entrega de 12 MW a través del SFV y 12 MW para la generación de hidrógeno.

Electrolizador con capacidad de 23 MW, un Fuel Cell con capacidad de 12 MW, un almacenamiento operativo y de respaldo de 2,996 kg de Hidrógeno.

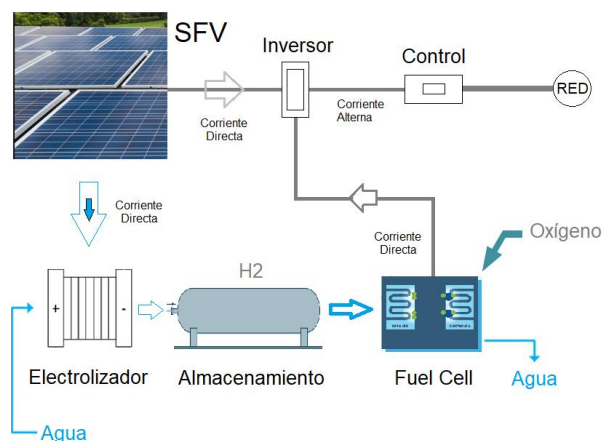


Figura 11. Diagrama esquemático SFV + Hidrógeno

Para la evaluación económica se consideró dentro del costo de inversión total los costos de operación y mantenimiento de la solución integral, ingresos únicamente por venta de energía, red asociada estimada, derechos de uso de suelo estimados y póliza de seguro de la central.

TABLA 2 EVALUACIÓN ECONÓMICA PRELIMINAR

	SFV + BB	SFV + Hidrógeno
Capacidad _{SFV}	30MW _p / 25MW _{ac}	43.8MW _p / 36.5MW _{ac}
Capacidad _{SAE}	63 MWh	59.92 MWh
Área _{SFV}	25.8 ha	39 ha
Área _{SAE}	1.2 ha	1 ha
CAPEX _{SFV}	25.50 MUSD	37.23 MUSD
CAPEX _{SAE}	21.90 MUSD	77.88 MUSD
CAPEX _{TOTAL}	53.9 MUSD	117.4 MUSD
O&M	1.16 MUSD	1.93 MUSD
Vida Útil	20 años	25 años
Energía	44 149 MWh/año	48 860 MWh/año
LCOE	153.2 USD/MWh	305.8/MWh

VI. VENTAJAS Y DESVENTAJAS TANTO ECONÓMICAS, TÉCNICAS Y AMBIENTALES

A. Las ventajas los SAE:

- Costos nivelados de energía atractivos en zonas con altos costos de producción de energía eléctrica como las penínsulas de Yucatán y Baja California.
- Experiencia con el empleo de la tecnología.
- Despacho óptimo con la coordinación de las centrales convencionales existentes e infraestructura eléctrica.
- Respaldo a la fuente solar cuyos costos de producción son significativamente bajos comparados con cualquier tecnología renovable variable a la red.
- Producción de energía limpia firme.

Adicionalmente, el hidrógeno tiene el contenido de energía más alto por unidad de masa de cualquier combustible. El proceso de electrólisis es altamente eficiente durante la vida útil del equipo de generación de hidrógeno. Puede transportarse

y distribuirse por medios conocidos, e inclusive los ductos pueden ser utilizados como tanques de almacenamiento. El almacenamiento puede realizarse por un tiempo indefinido, y tener unas pérdidas poco significativas. Su uso en celdas de combustible es altamente eficiente, p. ej. la potencia de una batería es la misma durante toda su carga.

B. Desventajas de los SAE

- Costos de inversión significativamente altos, el hidrógeno por encima de las Baterías.
- Las altas velocidades del viento representan un alto riesgo para la tecnología fotovoltaica asociada, ya que en las penínsulas se cuenta con presencia de posibles huracanes.
- Las grandes extensiones de área requeridas para los SFV conllevan riesgos ambientales y sociales.
- La interconexión al Sistema Eléctrico de una fuente renovable variable con 12.5 MW representa un problema técnico considerable en Baja California Sur que por el momento se encuentran suspendidas las interconexiones por el CENACE. Sin embargo, esta desventaja es ventaja para el Hidrógeno que puede fungir como respaldo sin reducir su vida útil.

Para el Hidrógeno se requiere de SFV más grandes debido a los procesos de conversión de energía descritos. La capacidad energética del hidrógeno depende de las condiciones físicas de presión y temperatura. El costo beneficio de las partes de compresión y transporte de un proyecto, pueden ser elevados.

VII. CONCLUSIONES

Los beneficios asociados a los SAE y las fuentes de generación renovable son: técnicos, económicos y ambientales mientras los costos sigan decreciendo y se convierten en una solución comercialmente viable, principalmente en regiones con altos costos de producción y necesidades de infraestructura de transmisión.

Las Baterías de ion-Li hoy en día son una solución técnica y comercialmente madura, con restricciones en la duración del almacenamiento comparado con el Hidrógeno.

El hidrógeno es un vector energético, sin embargo, es una tecnología emergente, aun cuando existe la tecnología necesaria para llevar a cabo su producción, almacenamiento y generación de energía eléctrica a partir del hidrógeno, los costos son comparativamente altos, con respecto a otras alternativas de solución al suministro de energía eléctrica por medio de energías renovables. La fortaleza del hidrógeno radica en la capacidad de almacenamiento y uso posterior.

Es necesario desarrollar más casos de estudio como el descrito, ya que permiten optimizar el uso de plantas de generación de energía por medio del planteamiento de escenarios, donde con base en datos reales de demanda, costos de producción de energía y condiciones de infraestructura en general, se puedan realizar modelos optimizados de despacho

de energía, y de esta forma determinar los beneficios de las tecnologías de almacenamiento de energía ya sea a través de baterías o hidrógeno a la infraestructura eléctrica mexicana, cubrir las brechas de conocimiento, y que su contribución al uso de las energías renovables en México sea factible técnica, económica y ambientalmente.

REFERENCIAS

- [1] IRENA, «Electricity storage and Renewables - Costs and Markets to 2030,» 2018.
- [2] LAZARD, «Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis,» 2019.
- [3] LAZARD, «Lazard's Levelized Cost of Storage Analysis,» 2019.
- [4] Wood Mackenzie, «U.S. Energy Storage Monitor:Q32018,» 2018.
- [5] L. G. Fonseca, «Evolución futura de costos de las energías renovables y almacenamiento en LATAM,» 2019.
- [6] NASA, «Datos Irradiación,» 2019. [En línea]. Available: <https://power.larc.nasa.gov/>. [Último acceso: 02 Julio 2020].
- [7] SENER, «Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2017-2031,» CDMX, 2017.
- [8] SENER, «Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2016-2030,» CDMX, 2016.
- [9] National Renewable Energy Laboratory (NREL), «Energy Storage: Possibilities for Expanding Electric Grid Flexibility,» Estados Unidos, 2016.
- [10] National Renewable Energy Laboratory (NREL), «Datos Irradiación,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.nrel.gov/energy-solutions/data-tools.html>. [Último acceso: 02 Julio 2020].
- [11] A. A. Abbas, DOE/EPRI Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA, Sandia National Laboratories, 2015, p. 347.
- [12] SENER, «Atlas nacional de Zonas de Potencial de Energías Limpias,» 2018. [En línea]. Available: <https://dgel.energia.gob.mx/azel/>. [Último acceso: 02 Julio 2020].
- [13] BloomerNEF, Energy Storage Systems Cost Survey, 2019.
- [14] C. Marquez, «Energy Storage Status Update Plus Survey,» ATAINsighth-CLEANHORIZON, 2019.
- [15] SENER, «Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2018-2032,» CDMX, 2018.
- [16] Writer's Handbook. Mill Valley, CA: University Science, 1989.
- [17] Querton, C.J., Samsatli, S., 2018. Power-to-gas for injection into the gas grid: What can we learn from real-life projects, economic assessments and systems modelling? *Renew. Sustain. Energy Rev.* 98, 302– 316. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.007>
- [18] IRENA, 2018a. «Hydrogen from Renewable Power: Technology Outlook for the Energy Transition. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi».
- [19] IRENA, 2019. «Hydrogen: a Renewable Energy Perspective».
- [20] NREL. All composite data products 8. 2012.
- [21] NETL., Seventh Edition Fuel Cell Handbook. United States. doi:10.2172/834188.
- [22] <https://www.energy.gov/>
- [23] <https://hidrogeno18.wixsite.com/>