

# 2. Catálogo de Tecnologías de almacenamiento de energía

## Referencias Hojas de Datos

### Apéndice A

Octubre, 2020



**MEDIO AMBIENTE**  
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



**INECC**  
INSTITUTO NACIONAL  
DE ECOLOGÍA Y  
CAMBIO CLIMÁTICO



Danish Energy  
Agency





## Directorio

**Dra. María Amparo Martínez Arroyo**

Directora General del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

## Elaboración, edición, revisión y supervisión:

Dra. Claudia Octaviano Villasana

Coordinadora General de Mitigación al Cambio Climático

Ing. Eduardo Olivares Lechuga

Director de Proyectos Estratégicos en Tecnologías de Bajo Carbono

Dr. Ing. Roberto Ulises Ruiz Saucedo

Subdirector de Innovación y Transferencia Tecnológica

Mtro. Loui Algren, (Global Cooperation)

Dr. Jacob Zeuthen, Chief adviser, Mtro. Christoph Wolter, Adviser (System Analysis)

Asesores de la Agencia de Energía de Dinamarca

Dra. Amalia Pizarro Alonso

Asesora del Programa México-Dinamarca para Energía y Cambio Climático

## Este reporte es parte del estudio:

Technology Roadmap and Mitigation Potential of Utility-scale Electricity Storage in Mexico

## Preparado por:

M. en I. Eléctrica Jorge Alejandro Monreal Cruz

M. en I. Energética Diego De la Merced Jiménez

Dr. Juan José Vidal Amaro

Consultor, Programa México-Dinamarca para Energía y Cambio Climático

Por encargo del INECC con apoyo del Programa México-Dinamarca para Energía y Cambio Climático

D.R. © 2020 Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

Bld. Adolfo Ruíz Cortines 4209,

Jardines en la Montaña, Ciudad de México. C.P. 14210

<http://www.gob.mx/inecc>





# Apéndice A: Selección de tecnologías de almacenamiento

Para elaborar una propuesta coherente y adecuada de las tecnologías a incluir en el catálogo de almacenamiento de la red eléctrica en México, es necesario considerar el contexto mexicano, y elegir aquellas que exhiban las mejores ventajas para México y el sistema eléctrico mexicano. Se desarrolla un proceso de tres etapas principales:

- Identificación de las diferentes tecnologías de almacenamiento de energía y tendencias mundiales de almacenamiento.
- Selección preliminar de tecnologías: definición de criterios de selección y construcción de una selección preliminar de tecnologías.
- Consulta de expertos: desarrollo de un taller con expertos en almacenamiento de energía para presentar la selección preliminar de tecnologías; creación de grupos de trabajo de expertos para elaborar la selección final de tecnologías de almacenamiento.

La selección preliminar de las tecnologías más adecuadas se realizó mediante un proceso de discusión, teniendo en cuenta las opiniones del equipo consultor nacional, el equipo de supervisión del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y los supervisores de la Agencia Danesa de Energía (DEA). El proceso de discusión condujo a una selección de criterios relevantes para evaluar las tecnologías de almacenamiento con el objetivo de generar una lista preliminar de tecnologías relevantes para México. Esta lista preliminar fue presentada a un grupo de expertos nacionales en almacenamiento de energía de la academia, las instituciones gubernamentales, las organizaciones no gubernamentales y el sector privado durante un taller de un día. El proceso de consulta de expertos continúa con la creación de grupos que trabajan en ocho especialidades: almacenamiento de agua por bombeo, baterías, almacenamiento térmico, almacenamiento de energía de gas comprimido, supercondensadores, hidrógeno, volantes y servicios de red. Estos grupos trabajarán coordinados por el equipo de consultores técnicos en la validación de la selección preliminar, para obtener el listado final de tecnologías que será el núcleo del catálogo de tecnologías de almacenamiento.

## Identificación de las diferentes tecnologías de almacenamiento de energía y tendencias mundiales de almacenamiento

Para obtener una primera lista de tecnologías de almacenamiento, se consultaron diferentes fuentes de información, entre ellas: el catálogo de almacenamiento de la Agencia Danesa de Energía "Datos tecnológicos para el almacenamiento de energía", la base de datos de almacenamiento de EE. UU. del Departamento de Energía (DOE), el "Almacenamiento de electricidad y energías renovables: Costos and mercados a 2030" informe de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) y el "Almacenamiento de energía: Seguimiento de las tecnologías que transformarán el sector

energético” de Deolitte & Touche LLP. Estos documentos permitieron identificar una amplia gama de tecnologías, así como características técnicas y servicios que pueden brindar las tecnologías de almacenamiento de energía. La amplia lista de tecnologías identificadas en una primera exploración incluyó:

**Tabla 1.** Tecnología identificada en la Base de Datos de DOE. Fuente: (DOE, 2019).

	Tecnología		Tecnología
1	Batería de Ion-Litio	29	Batería de Flujo Redox Vanadio
2	Batería de Ion-Litio-Fosfato	30	Batería de flujo
3	Batería de Ion-Litio-Titanato	31	Batería de flujo de bromuro de hidrogeno
4	Batería de polímero de Litio	32	Batería de flujo de Hierro-Cromo
5	Batería de Litio, Níquel, Manganeso, Cobalto	33	Batería de flujo de Vanadio
6	Batería Litio Oxido de Manganeso	34	Almacenamiento térmico-Agua helada
7	Batería Litio, Níquel Cobalto, Aluminio	35	Almacenamiento térmico-con hielo
8	Batería Titanato de Litio	36	Almacenamiento térmico-con calor
9	Electroquímica	37	Almacenamiento térmico
10	Capacitor electroquímico	38	Almacenamiento térmico-con concreto
11	Batería de Plomo-Acido	39	Almacenamiento por Rebombeo hidráulico (PHS)-ciclo cerrado
12	Batería híbrida Plomo-Acido/Capacitor electroquímico	40	Almacenamiento por Rebombeo hidráulico (PHS)-ciclo abierto
13	Batería Plomo-Carbón	41	Almacenamiento por Rebombeo hidráulico (PHS)
14	Batería avanzada de Plomo-Acido	42	Almacenamiento por Rebombeo hidráulico-con agua de mar
15	Batería Plomo-Acido Regulada por válvula	43	Almacenamiento con aire comprimido liquido
16	Batería de Ion-Sodio	44	Almacenamiento con aire comprimido-modular isotérmico
17	Batería basada en Sodio	45	Almacenamiento con aire comprimido
18	Batería de cloruro de Sodio-Níquel	46	Almacenamiento con aire comprimido-subterráneo
19	Batería de Sodio-azufre	47	Almacenamiento con aire comprimido-modular
20	Batería de Sodio-Níquel	48	Almacenamiento con aire comprimido-adiabático
21	Batería de Flujo Zinc-Hierro	49	Almacenamiento con aire comprimido-adiabático avanzado
22	Batería de Dioxido de Zinc-Manganeso	50	Almacenamiento con aire comprimido-termal subterráneo
23	Batería de Flujo de Oxido de Zinc-Níquel	51	Almacenamiento con Gas Natural comprimido-subterráneo y combustión
24	Batería de flujo de Bromuro de Zinc	52	Ozone
25	Batería de Zinc-aire	53	Almacenamiento gravitacional
26	Batería de Níquel-Hierro	54	Almacenamiento térmico con sales fundidas
27	Batería Híbrida Miquel-metal	55	Almacenamiento con hidrogeno
28	Batería de Níquel-Cadmio	56	Volantes de inercia



**Tabla 2.** Priorización de Tecnologías. Elaboración propia con datos de DOE. (DOE, 2019).

Tecnología de almacenamiento	A. Priorización basada en la capacidad instalada	B: Priorización basada en la generación	C: Priorización basada en el número de instalaciones	A+B+C	Priorización global
Rebombeo Hidráulico PHS	1	1	3	5	1
Batería basada en Litio	3	3	2	8	2
Electroquímico	5	2	1	8	3
Procesos térmicos	7	4	4	15	4
Térmico con sales fundidas	2	8	9	19	5
Con aire comprimido	4	5	11	20	6
Batería de Sodio Azufre	8	7	6	21	7
Otros tipos de baterías (Va, Fe, Br)	12	6	7	25	9
Volantes de inercia	6	15	8	29	10
Baterías basadas en Zinc	11	10	10	31	11
Otros tipos	9	12	14	35	12
Hidrogeno	15	11	12	38	13
Capacitor electroquímico	13	13	15	41	14
Baterías basadas en níquel	14	14	13	41	15

**Tabla 3.** Tecnologías preseleccionadas. Elaboración propia con datos de DOE. Fuente: (DOE, 2019)

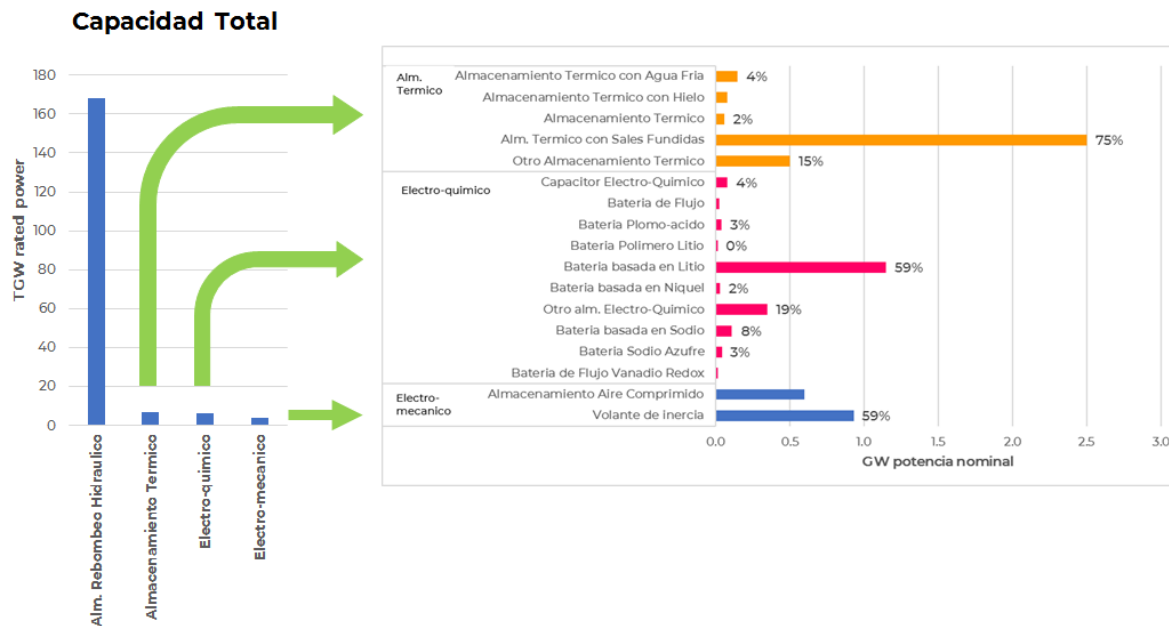
Tecnología principal	Variaciones de la tecnología
Almacenamiento por Rebombeo hidráulico (PHS)	Almacenamiento por Rebombeo hidráulico (PHS)-ciclo cerrado
	Almacenamiento por Rebombeo hidráulico (PHS)-ciclo abierto
Baterías	Basadas en Litio
	Basadas en Sodio
	Basadas en Plomo-Acido
	Flujo Redox Vanadio
Térmico	Sales fundidas
Almacenamiento con aire comprimido-	
Supercapacitores	
Hidrogeno	
Volantes de inercia	

Las tecnologías identificadas se centraron en el almacenamiento de energía para una escala de servicios públicos. Las opciones de almacenamiento térmico como Almacenamiento de Calor Estacional, Tanques de Agua Caliente, fueron descartadas ya que México es un país que generalmente no requiere servicios de energía térmica para



calefacción domiciliaria, sin embargo, no se deben descartar aplicaciones de calor para procesos industriales, sin embargo, estas tecnologías no son en el alcance de este estudio que se centra en el almacenamiento de energía para el sistema eléctrico.

Las tendencias internacionales en almacenamiento de energía (Figura 1) revelan que el 96% (176 GW) de la capacidad total de almacenamiento instalada para 2017 correspondía a almacenamiento de agua por rebombeo hidráulico, el 1,9% (3,3 GW) a almacenamiento térmico, el 1,1% (1,9 GW) a baterías y 0,9% (1,6 GW) a otras tecnologías de almacenamiento mecánico.



**Figura 1.** Capacidad operativa mundial de almacenamiento de electricidad por tecnología 2017. Fuente: Almacenamiento de electricidad y renovables: Costos y mercados hasta 2030. Fuente: (IRENA, 2017).

Por otro lado, el número de proyectos totales por capacidad y tipo de tecnología (Figura 2) muestra que el mayor número de instalaciones corresponde a baterías, específicamente a baterías electroquímicas y de litio, seguidas del almacenamiento por bombeo hidráulico y procesos térmicos; Además, la mayoría de las tecnologías de almacenamiento se instalan para proyectos con capacidades totales inferiores a 10 MW, mientras que el almacenamiento por bombeo hidráulico es particularmente adecuado para proyectos de gran tamaño.



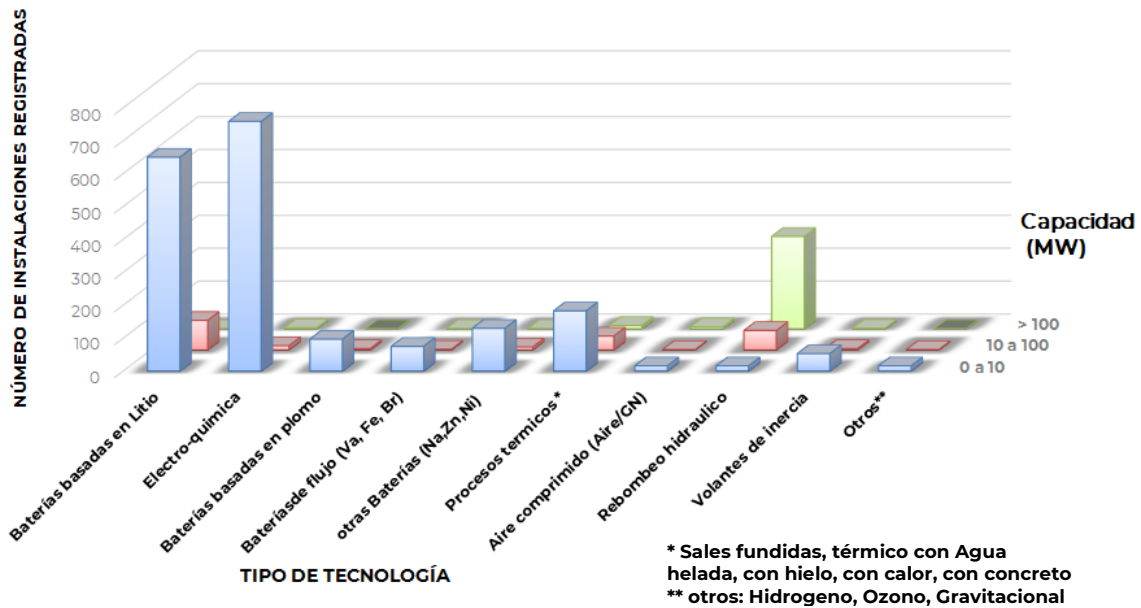


Figura 2. Número global de proyectos de almacenamiento de electricidad por capacidad de potencia (MW) y tecnología. Elaboración propia con datos de (DOE, 2019).

## Criterios de preselección

El catálogo tiene el propósito de servir como referencia para el desarrollo y aplicación de tecnologías de almacenamiento de energía para ayudar a la incorporación de mayores proporciones de energías renovables al sistema eléctrico mexicano. En consecuencia, las tecnologías de almacenamiento que se incluirán en el catálogo deben mostrar una ventaja particular para México y el sistema eléctrico mexicano.

Para alcanzar este objetivo, se eligieron una serie de criterios para evaluar las tecnologías y seleccionar un grupo pertinente para el contexto mexicano; algunas tecnologías podrían presentar claras ventajas técnicas, otras podrían ser económicamente atractivas, mientras que otras podrían estar en etapas más tempranas de desarrollo. Para el sistema eléctrico mexicano, un conjunto particular de características técnicas puede ser de interés; por otro lado, México podría aprovechar una tecnología en particular a través del desarrollo de cadenas de valor, debido a un potencial natural para una tecnología. Sin embargo, en términos técnicos considerando: las necesidades y servicios que requiere la red eléctrica mexicana, el desarrollo ambiental o económico, así como el desarrollo de capacidades.

The selection criteria were divided into 3 main groups:

The environmental impacts: Considers essentially the potential to reduce GHG emissions and other aspects related to the particular conditions of technology such as: the possibility of generating hazardous waste; the surface and change of land uses and the possible



contamination of these; the percentage of recycling of infrastructure and materials; besides the possibilities of generation of noise, heat, and / or dust.

The technical aspects: It relates directly to the technical characteristics of the technology such as capacity ranges, response time, energy density, energy to power ratio, round-trip efficiency, and state of charge or depth and self-discharge and the time of life, with the services it can provide, the latter essentially represent the technical characteristic that make a differentiation between technologies can offer, to decide which may be the most appropriate choice. In addition, other important technical aspects are related to the generation of capacities for the use and development of technology, the level of technological maturity, and costs.

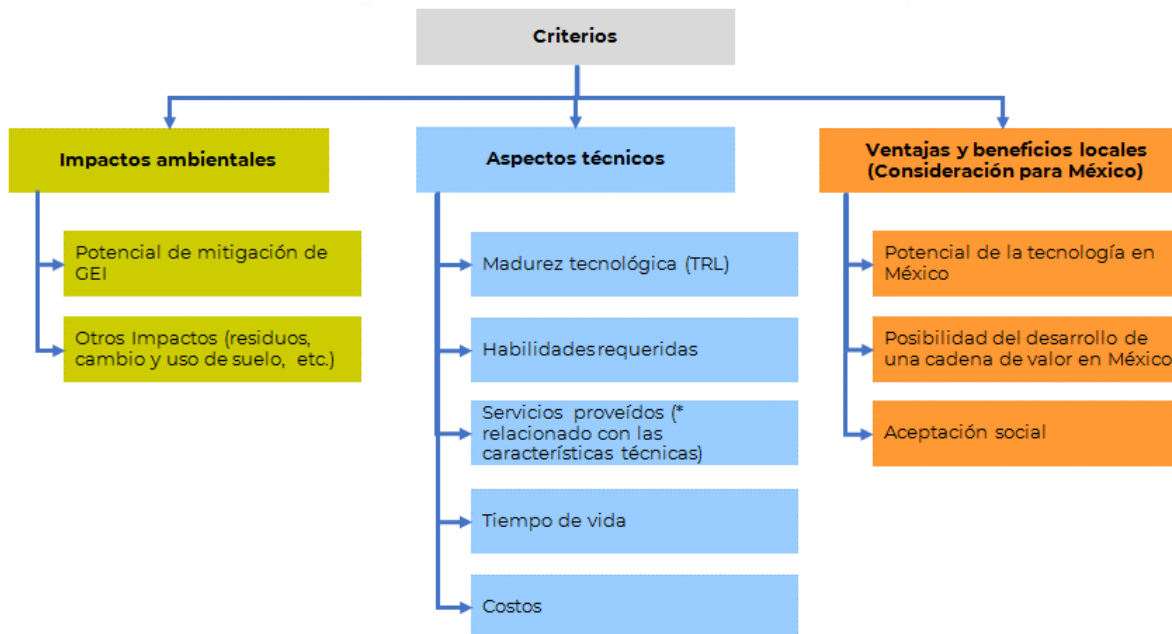
Advantages and benefits: It considers the criteria that describe the advantages, disadvantages, impacts and benefits related to the particular conditions of the country such as: the potential of technology with respect to the creation of value chains, the physical conditions for the deployment of the technology, the available and necessary infrastructure, suppliers, manufacture and import of equipment. The Figure 3 shows a diagram with the list of criteria selected.

#### **Los criterios de selección se dividieron en 3 grupos principales:**

**Los impactos ambientales:** Considera esencialmente el potencial para reducir las emisiones de GEI y otros aspectos relacionados con las condiciones particulares de la tecnología como: la posibilidad de generar residuos peligrosos; la superficie y cambio de usos del suelo y la posible contaminación de estos; el porcentaje de reciclaje de infraestructura y materiales; además de las posibilidades de generación de ruido, calor y/o polvo.

**Los aspectos técnicos:** Se relaciona directamente con las características técnicas de la tecnología, tales como rangos de capacidad, tiempo de respuesta, densidad de energía, relación energía/potencia, eficiencia de ciclo completo, estado de carga o profundidad de descarga, auto-descarga y tiempo de vida. También se relacionan con los servicios que puede brindar, estos últimos representan esencialmente la característica técnica que permite hacer una diferenciación de lo que pueden ofrecer las tecnologías, lo anterior para decidir cuál puede ser la opción más adecuada. Además, se consideran otros aspectos técnicos importantes que están relacionados con: la construcción de capacidades para el uso y desarrollo de tecnología, el nivel de madurez tecnológica y los costos.

**Ventajas y beneficios:** Considera los criterios que describen las ventajas, desventajas, impactos y beneficios relacionados con las condiciones particulares del país tales como: el potencial de la tecnología con respecto a la creación de cadenas de valor, las condiciones físicas para el despliegue del tecnología, la infraestructura disponible y necesaria, proveedores, fabricación e importación de equipos. La Figura 3 muestra un diagrama con la lista de criterios seleccionados.



**Figura 3.** Criterios para evaluar la pertinencia de las tecnologías de almacenamiento para México y el sistema eléctrico mexicano. Fuente: elaboración propia.

**Tabla 4.** Criterios y escalas de evaluación de los impactos ambientales. Fuente: elaboración propia.

Criterio	Descripción	Método de evaluación
Potencial de mitigación	Posible reducción de emisiones en toneladas de CO <sub>2</sub> e/año	<p><b>No adecuado:</b> reducción mínima de emisiones</p> <p><b>Menos adecuado:</b> emisiones de reducción media</p> <p><b>Adecuado:</b> Gran reducción por almacenamiento a granel, según generación internacional</p>
Otros impactos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Generación de residuos peligrosos</li> <li>• Posible contaminación del suelo</li> <li>• Consumo de superficies</li> <li>• Emisiones de Ruido, Calor, Polvos</li> <li>• Costos de recuperación</li> <li>• % de materiales incorporados dentro la tecnología que pueden ser reciclados.</li> </ul>	<p><b>Adecuado:</b> Considera que tiene un impacto mínimo en el medio ambiente.</p> <p><b>Menos adecuado:</b> Considera que tiene un alto impacto en el medio ambiente.</p> <p><b>No apto:</b> Considera que tiene impactos peligrosos en el medio ambiente.</p>



**Table 5.** Criteria and evaluation scales for technological issues. Source: own elaboration.

Criterio	Descripción	Método de evaluación
Madurez (potencial de mejora en la relación costo-rendimiento)	Indicates the level of development and application of technology	<p><b>Adecuado:</b> Existen instalaciones operativas que atraen directamente inversiones y generan empleos (TRL 7 a TRL 9)</p> <p><b>Menos adecuado:</b> es aplicable y hay instalaciones que operan de manera confiable en un entorno relevante (TRL 6 a TRL7).</p> <p><b>No Apto:</b> No tiene aplicaciones a nivel utilitario. Está restringido a pruebas de laboratorio e investigación, prototipos e instalaciones de prueba (TRL 1 a TRL 5)</p>
Requerimiento de habilidades	Indica el nivel de oferta de capacidad en el país para el desarrollo, instalación y gestión de tecnología de almacenamiento.	<p><b>Adecuado:</b> Se ofrecen servicios comerciales para la gestión e instalación de tecnología por parte de un número considerable de personas, se desarrollan investigaciones, existen competencias legales y de mercado y se dispone de capacitación técnica en el país.</p> <p><b>Menos adecuado:</b> Existen capacidades para el manejo e instalación de tecnología, se desarrolla investigación en el país sobre tecnología, habilidades legales y de mercado para el desarrollo.</p> <p><b>No Adecuado:</b> No existen las capacidades en el país para el manejo e instalación de la tecnología.</p>
Servicios proveídos	<p>Indica la idoneidad de la tecnología para los servicios requeridos por la red eléctrica y que la tecnología puede brindar.</p> <p>Los servicios considerados más importantes fueron:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Arbitraje energético,</li> <li>• Regulación primaria (segundos),</li> </ul>	<p><b>Adecuado:</b> Es capaz de ofrecer el servicio requerido por la red en las mejores condiciones de bajos costos y alta confiabilidad.</p> <p><b>Menos adecuado.</b> Es capaz de ofrecer el servicio requerido por la red en condiciones de costos accesibles y confiabilidad.</p> <p><b>No apto:</b> No es capaz de brindar el servicio indicado que requiere la red, o lo hace en</p>



Criterio	Descripción	Método de evaluación
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Regulación secundaria (minutos),</li> <li>Nivelación de picos,</li> <li>Gestión de la congestión,</li> <li>Almacenamiento a largo plazo,</li> <li>Aplazamiento de inversión de T&amp;D,</li> <li>Reafirmante de la capacidad RE.</li> </ul> <p>* Es pertinente mencionar que existen ciertos servicios que son comunes a todas las tecnologías, o no representan una diferenciación significativa y por eso no son considerados para una evaluación.</p>	condiciones de altos costos y baja confiabilidad tecnológica
Tiempo de vida	Indica la vida estimada de la tecnología de almacenamiento en ciclos de carga-descarga equivalentes completos.	<p><b>Adecuado:</b> más de 100,000</p> <p><b>Menos adecuado:</b> hasta 10,000 a 100,000</p> <p><b>No apto:</b> menos de 10,000</p>
Costos (CAPEX-energía)	Capital necesario para la compra de los equipos/ tecnología necesarios para la instalación.	<p><b>No apto:</b> más de 10,000</p> <p><b>Menos adecuado:</b> de 1,000 a 9,999</p> <p><b>Adecuado:</b> menor que 1,000</p> <p>Criterios de evaluación utilizados para el costo de kW instalados (USD / kWh)</p>

**Tabla 6.** Criterios y escalas de evaluación de ventajas y beneficios locales (consideración para México). Fuente: elaboración propia.

Ventaja o beneficios	Descripción
Potencial de la tecnología en México	En referencia a las ventajas y beneficios que permitirían el despliegue de tecnología de almacenamiento en México, como las condiciones físicas disponibles para el despliegue (recursos,



Ventaja o beneficios	Descripción
	infraestructura, empresas disponibles, condiciones geológicas)
Posibilidad de Desarrollo de una cadena de valor en México	En referencia a las ventajas y beneficios que permitirían el desarrollo de una cadena de valor en torno a la implementación de tecnología de almacenamiento como, disponibilidad de equipos de compra en México, disponibilidad de producción local, cadenas de comercialización existentes, ventajas fiscales y las condiciones legales disponibles para el despliegue del mercado.
Aceptación social	Aceptación significativa por parte de: actores clave (como la participación de la población indígena) localización de la instalación (cerca de las ciudades, ANP, parques industriales) compra y uso de la disponibilidad de tierras.

**Tabla 7.** Escalas de evaluación por ventajas o beneficios. Fuente: elaboración propia.

Impacto	Probabilidad		
	Baja	Media	Alta
<b>Mínimo.</b> Interrupción mínima. No afecta los tiempos de implementación de la tecnología	Muy adecuada +	Adecuada	Menos adecuada
<b>Considerable.</b> Afecta los tiempos de implementación, aumenta la complejidad de la coordinación de actividades y la calidad de la tecnología puede verse comprometida o debe ser revisada.	Adecuada	Menos adecuada	No adecuada
<b>Significativo.</b> Afecta el propósito y la calidad de la implementación de la tecnología de almacenamiento con el potencial de cancelarla o interrumpirla.	Menos adecuada	No adecuada	No adecuada +

Estos criterios permitieron realizar una evaluación de las tecnologías y seleccionar una primera propuesta de las más adecuadas para el contexto mexicano. Se eligió un semáforo de tres colores para evaluar la idoneidad de las tecnologías con respecto a cada criterio.



# Supuestos y consideraciones para la preselección de tecnologías de almacenamiento de energía

La Tabla 8 muestra la evaluación matricial de las tecnologías según los criterios seleccionados. Cinco tecnologías donde se encontraron particularmente relevantes para México, estas cinco son: PHS, sales fundidas, volantes, baterías de plomo-ácido y baterías de litio.



Figura 4. Evaluación matricial de tecnologías de almacenamiento según los criterios seleccionados. Fuente: elaboración propia.

Tecnología/criterio	Gestión de cuenta					Alm. Estacional	Diferimiento de T&D	Respuesta secundaria	Potencial de mejora de la relación desempeño-costo	Consideración para México	Costo	Impacto ambiental
	Arbitraje de energía (\$)	Regulación primaria (seg)	Regulación secundaria (min)	Nivelación de picos	Gestión de la congestión	Alm. de largo plazo	Diferimiento de inversión en T&D	Consolidación de capacidad de ER				
Alm. Por rebombeo hidráulico (PHS)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Alm. Por aire comprimido (CAES)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Sales Fundidas	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Hidrogeno	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Volantes de Inercia	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
o Baterías Plomo-acido	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
o Baterías basadas en Litio	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
o Baterías basadas en Sodio	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
o Baterías de flujo	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
o Otras baterías (Zn,NI)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Super Capacitores	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
<b>Relevante para México</b>		●	Apropiado			●	Menos apropiado		●	No apropiado		

## Servicios previstos

Se requieren diferentes tipos de servicios en las operaciones de la red eléctrica para su óptimo funcionamiento y para garantizar los niveles de eficiencia, confiabilidad, continuidad y seguridad del Sistema Eléctrico Nacional, siendo su propósito principal brindar uniformidad en la demanda de generación de energía, maximizando la eficiencia y reduciendo los costes energéticos a largo plazo. A su vez, estos servicios se refieren a temas como la gestión de niveles de tensión en las redes, frecuencia, congestiones en la red, balanceo de carga, entre otros directamente vinculados a la disponibilidad y gestión de la energía eléctrica, convirtiéndose así en el nicho de aplicación de tecnologías para la energía almacenamiento.

Existen numerosas aplicaciones específicas para los sistemas de almacenamiento de energía dentro de la cadena de valor del suministro de energía eléctrica, sin embargo, en base a requisitos técnicos similares, se pueden agrupar bajo una aplicación principal o primaria (Oliver Schmidt, 2019), para facilitar su análisis y evaluación. (Tabla 8).

**Tabla 8.** Revisión y descripción de 27 servicios de almacenamiento (aplicaciones) de electricidad de propósito único y asignación a servicios básicos con base en requisitos técnicos similares. (Schmidt, 2019)

Aplicación	Descripción	Denominación alternativa	Aplicación primaria
Arbitraje mayorista	Comprar energía en períodos de precios bajos y vender en períodos de precios altos en el mercado mayorista de energía	Traslado temporal de energía eléctrica	Arbitraje de energía
Arbitraje minorista	Comprar energía en períodos de precios bajos y vender en períodos de precios altos en el mercado minorista de energía	Arbitraje del consumidor final	Arbitraje de energía
Reserva de regulación	Corrige automáticamente los cambios continuos, rápidos y frecuentes en la carga o generación dentro del intervalo de mercado más corto aplicable	Regulación de frecuencia y control de frecuencia	Respuesta primaria
Reserva primaria	Estabilizar automáticamente la frecuencia después de un cambio repentino y poco común de carga o generación	Reserva de contingencia primaria Respuesta a la frecuencia	Reserva primaria
Reserva de seguimiento	Corregir manualmente los desequilibrios previstos entre carga y generación	Seguimiento a la carga Reserva para balance	Respuesta secundaria
Reserva rodante secundaria	Vuelve automáticamente la frecuencia al nivel nominal después de un cambio repentino y poco común de carga o generación con el generador en funcionamiento	Reserva rodante	Respuesta secundaria
Reserva no rodante secundaria	Vuelve automáticamente la frecuencia al nivel nominal después de un cambio	Reserva contingente secundaria	Respuesta secundaria



Aplicación	Descripción	Denominación alternativa	Aplicación primaria
	repentino y poco común en la carga o generación con un generador no operativo	Reserva no rodante	
Reserva para rampeo	Corrige manualmente los cambios inesperados, severos y poco frecuentes en la carga o generación que no son instantáneos		Respuesta secundaria
Incertidumbre debida a integración de renovables	Cambiar y optimizar la producción de los recursos de suministro variable cuando la generación no se ajusta a las previsiones	Corrección debido a las inexactitudes de los pronósticos  Reafirmación de capacidad de renovables	Respuesta secundaria
Reserva terciaria	Reemplazar automáticamente la reserva de contingencia primaria y secundaria	Reserva de contingencia primaria Reserva suplementario/ de remplazo	Respuesta terciaria
Reemplazo de central "piquera"	Garantizar la disponibilidad de capacidad de generación suficiente en todo momento	Suministro eléctrico Mecanismo de capacidad Microred	Reemplazo de central para picos
Arranque de emergencia (autógeno)	Restaurar las operaciones de plantas de energía después de una interrupción de la red sin una fuente de alimentación externa		Arranque de emergencia (autógeno)
Almacenamiento estacional	Compensar la interrupción del suministro a largo plazo o la variabilidad estacional en la oferta y la demanda.		Almacenamiento estacional
Diferimiento de actualización de trasmisión	Aplazar las actualizaciones de la infraestructura de transmisión necesarias cuando los flujos de potencia máximos superan la capacidad existente	Soporte a la trasmisión Eficiencia de la red/sistema	Diferimiento de inversiones en T%D
Diferimiento de actualizaciones de la distribución	Aplazar las actualizaciones de la infraestructura de distribución necesarias cuando los flujos de energía pico superan la capacidad existente	Subestaciones de distribución Eficiencia de la red/sistema	Diferimiento de inversiones en T%D
Alivio a la congestión en trasmision	Evitar el riesgo de sobrecargar la infraestructura existente que podría dar lugar a un reenvío y diferencias de precios locales	Soporte a la trasmisión Eficiencia de la red/sistema	Gestión de la congestión
Manejo de cuenta	Adquiera energía en períodos de precios bajos y utilícela durante períodos de precios altos	Gestión de energía Manejo de cargos por tiempo de uso (ToU) minorista	Manejo de cuenta

Aplicación	Descripción	Denominación alternativa	Aplicación primaria
Reducción de demanda de carga en Distribución	Reducir la demanda suministrada por la red durante los períodos de mayor costo de la red de distribución	Reducción de picos Gestión de zonas críticas	Manejo de cuenta
Reducción de demanda de carga en Trasmisión	Reducir la demanda suministrada por la red durante los períodos de mayor costo de la red de transmisión.	Reducción de picos, Evitación de cargos por triadas o también conocidos como cargos por demanda pico, Cargos por acceso a trasmisión	Manejo de cuenta
Autoconsumo de energías renovables	Minimizar la exportación de electricidad renovable y aumentar el autoconsumo para maximizar los beneficios financieros		
Calidad de la energía (potencia)	Proteja la carga en el sitio contra pérdidas de energía de corta duración o variaciones de voltaje o frecuencia		Calidad de la energía
Confiabilidad de la energía (potencia)	Llenar la brecha entre los recursos variables y la demanda	Energía en el sitio, Fuera de la red	Confiabilidad de la energía
Energía (potencia) de respaldo	Proporcionar energía sostenida durante la pérdida total de energía de la fuente de energía	Respaldo en sitio, Suministro de emergencia, Resiliencia	Confiabilidad de la energía
variabilidad en la Integración de renovables	Cambie y optimice la producción de los recursos de suministro variable para mitigar los cambios de producción y hacer coincidir la oferta con la demanda	Almacenamiento fuera de horas críticas/pico Integración de fuentes intermitentes o variables Trasferencia en sitio de generación	Confiabilidad de la energía
Soporte al voltaje	Mantenga los niveles de voltaje en las redes a través de la fuente de alimentación reactiva / reducción		
Soporte de voltaje con potencia reactiva	Mantenga los niveles de voltaje en la red de transmisión a través de la fuente de alimentación reactiva / reducción		

En la table 8 se revisaron 27 servicios de almacenamiento de electricidad de propósito único y la asignación a servicios básicos basados en requisitos técnicos similares (Schmidt, 2019).

Los supuestos para evaluar la idoneidad de las tecnologías apropiadas para brindar los diferentes tipos de servicios consideraron diversa información bibliográfica de las que podemos destacar:

- Las tecnologías de almacenamiento de energía se pueden utilizar en muchas aplicaciones (o servicios) diferentes que cubren toda la cadena de suministro de energía eléctrica, sin embargo, la diferencia de los requisitos técnicos de estos servicios es lo que determina la idoneidad de las tecnologías aplicables.
- Por sus propias características, diversas tecnologías son capaces de brindar varios tipos de servicios diferentes (Tabla 9), pero su aplicación en un servicio específico de manera óptima se relaciona principalmente con características técnicas como tiempo de respuesta (segundos), potencia nominal (MW), la duración de la descarga (horas) y la cantidad de uso o ciclos de descarga (por año); que también son particularmente importantes en la atención a los requisitos técnicos específicos de cada servicio o aplicación (Tabla 9).

**Tabla 9.** Características de rendimiento de las tecnologías de almacenamiento de electricidad. Fuente: modificado de (Schmidt, 2019).

Tecnología	Rango de energía (MW)	Descarga (Hr.)	Tiempo de vida (Núm Ciclos)	Tiempo de respuesta (sec.)
Rebombeo hidráulico (PHS)	10 – 5,000	1 - 24	20,000 -50,000	$> 10^7$
Aire comprimido (CAES)	5 - 400	1 -24	$> 13,000$	$> 10^7$
Volantes de inercia	0.01 - 20	$< 0.5$	20,000 – 225,000	$< 10^7$
Plomo-Acido	0.005 - 100	0.25 - 10	$< 5,500$	$< 10^7$
Ion-litio	0.001 - 35	0.25 - 5	2,000 – 3,500	$< 10^7$
Sodio Azufre	0.05 - 50	0.0167 - 8	2,500 – 4,500	$< 10^{10}$
Flujo Redox	0.02 - 50	0.0167 - 10	5,000 – 13,000	$< 10^7$
Hidrogeno	0.3 - 500	0.0167 - 24	$< 20,000$	$< 10^7$
Supercapacitor	$< 4$	$< 1$	$< 100,000$	$< 10^7$

**Nota:** ciclos se refiere a ciclos de carga y descarga equivalentes completos

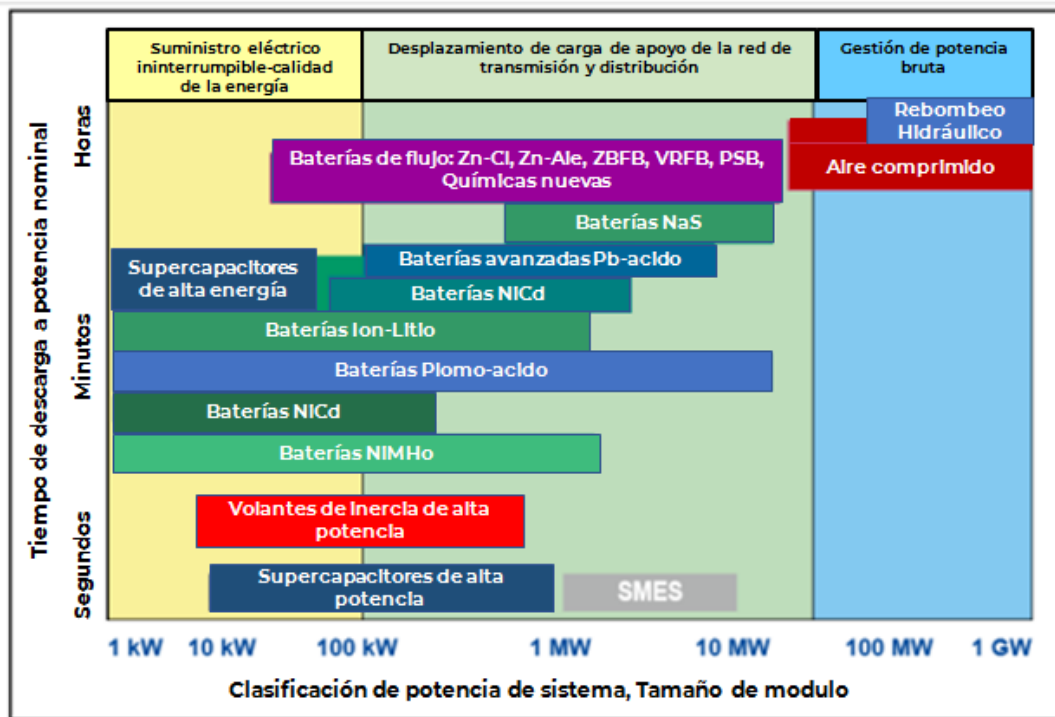
**Tabla 10.** Requisitos técnicos para aplicaciones de almacenamiento de electricidad: Fuente: modificación de (Schmidt, 2019).

Aplicación	Tamaño (MW)	Duración (Hr.)	Ciclos (Ciclos/año)	Tiempo de respuesta (sec.)
Arbitraje de energía	0.001 – 2,000	1 - 24	50 -400	> 10 <sup>5</sup>
Respuesta primaria	1 – 2,000	0.02 - 1	250 – 15,000	< 10 <sup>2</sup>
Respuesta secundaria	10 – 2,000	0.25 - 24	20 – 10,500	> 10 <sup>2</sup>
Respuesta terciaria	5 – 1,000	> 1.5	20- 50	> 10 <sup>2</sup>
Reemplazo de centrales piqueras	1 - 500	2 - 6	5 - 100	> 10 <sup>5</sup>
Arranque de emergencia	0.1 -400	0.25 - 4	1 - 20	> 10 <sup>5</sup>
Almacenamiento estacional	500 – 2,000	24 – 2,000	1 - 5	> 10 <sup>5</sup>
Diferimiento de actualizaciones en T&D	1 - 500	2 - 8	10 - 500	> 10 <sup>5</sup>
Gestión de la Congestión	1 - 500	1 - 4	50 - 500	> 10 <sup>5</sup>
Manejo de cuenta	0.001 - 10	1 - 6	50 - 500	> 10 <sup>5</sup>
Calidad de la energía	0.05 - 10	0.003 – 0.5	10 - 200	< 10 <sup>1</sup>
Confiabilidad de la energía	0.001 - 10	2 - 10	50 - 400	> 10 <sup>1</sup>

**Nota:** ciclos se refiere a ciclos de carga y descarga equivalentes completos

- Esto muestra que los requisitos técnicos de cada servicio específico, y su nivel de operación dentro de la red están intrínsecamente relacionados, por lo que una comparación de estos principales requisitos técnicos con las características operativas de las diferentes tecnologías permitirá una aproximación de la idoneidad de las tecnologías. para cada uno de los diferentes servicios considerados para su evaluación, pero, no representa un enfoque infalible ya que los avances tecnológicos en materia de electrónica de potencia y la tecnología de gestión de energía eléctrica en general permiten que varias tecnologías amplíen notablemente sus campos de aplicación.
- Al mismo tiempo es pertinente señalar que los servicios necesarios para el óptimo funcionamiento de la red eléctrica nacional se pueden visualizar en diferentes apartados en relación con sus requerimientos técnicos y se distinguen principalmente por su nivel de operación y campo de aplicación. En su estudio ALMACENAMIENTO DE ELECTRICIDAD Y RENOVABLES: COSTOS Y MERCADOS HASTA 2030 la Agencia Internacional de Energías Renovables, distingue en 3 niveles principales (IRENA, 2017):
  - o **Gestión de energía mayorista**, donde se distinguen grandes tamaños de módulo y rangos de potencia del sistema (> 50 MW) y, en general, se requiere un tiempo de respuesta mayor (> 60 segundos);
  - o **Cambio de carga para soporte de la red de transmisión y distribución:** donde los tamaños de los módulos y los rangos de potencia son más moderados (> 100 kW <50

- o **Alimentación ininterrumpida-calidad de potencia:** que solicitan un tiempo de respuesta inmediato (<10 segundos), pero en general con módulos más pequeños y rangos de potencia (<100 kW).



Source: US DOE/EPRI, 2015.

Note: Zn-Cl = zinc chlorine flow battery, Zn-Air = zinc air flow battery, ZBFB = zinc bromine flow battery, VRFB = vanadium redox flow battery, PSB = polysulfide bromine flow battery, NaS = sodium sulphur, NaNiCl = sodium nickel chloride, NiCd = nickel cadmium, NiMH = nickel-metal hydride, SMES = superconducting magnetic energy storage.

**Figura 5.** Posicionamiento de diversas tecnologías de almacenamiento de energía según su potencia nominal y tiempos de descarga a potencia nominal. (IRENA, 2017).

In this way it can be observed that although various technologies can provide various types of services, they will be more appropriate at certain levels depending on their technical characteristics and a final decision must be coupled with other criteria such as costs, local benefits, environmental impacts and the potential for improving the performance of technology in the short and medium term and its technological maturity.

In an internal work developed jointly by the consultants team, the Danish Energy Agency and the National Institute of Ecology and Climate Change, a selection of applications considered relevant for the development of energy storage in the National Electric System network (SEN) of Mexico was determined, and contrasting the information presented above, the suitability of the technologies in these applications was evaluated according to the proposed methodology.

De esta forma se puede observar que, si bien diversas tecnologías pueden brindar diversos tipos de servicios, serán más adecuadas en ciertos niveles en función de sus características técnicas y una decisión final debe ir acompañada de otros criterios como costos, beneficios locales,



impactos ambientales. y el potencial para mejorar el desempeño de la tecnología en el corto y mediano plazo y su madurez tecnológica.

En un trabajo interno desarrollado en conjunto por el equipo de consultores, la Agencia Danesa de Energía y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, se determinó una selección de aplicaciones consideradas relevantes para el desarrollo del almacenamiento de energía en la red del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) de México, y contrastando la información presentada anteriormente, se evaluó la idoneidad de las tecnologías en estas aplicaciones de acuerdo con la metodología propuesta.

Tecnología/criterio	Gestión de cuenta					Alm. Estacional	Diferimiento de T&D	Respuesta secundaria
	Arbitraje de energía (\$)	Regulación primaria (seg)	Regulación secundaria (min)	Nivelación de picos	Gestión de la congestión	Alm. de largo plazo	Diferimiento de inversión en T&D	Consolidación de capacidad de ER
Alm. Por rebombeo hidráulico (PHS)	●	●	●	●	●	●	●	●
Alm. Por aire comprimido (CAES)	●	●	●	●	●	●	●	●
Sales Fundidas	●	●	●	●	●	●	●	●
Hidrogeno	●	●	●	●	●	●	●	●
Volantes de Inercia	●	●	●	●	●	●	●	●
o Baterías Plomo-acido	●	●	●	●	●	●	●	●
o Baterías basadas en Litio	●	●	●	●	●	●	●	●
o Baterías basadas en Sodio	●	●	●	●	●	●	●	●
o Baterías de flujo	●	●	●	●	●	●	●	●
o Otras baterías (Zn,Ni)	●	●	●	●	●	●	●	●
Super Capacitores	●	●	●	●	●	●	●	●
<b>Relevante para México</b>	● Apropiado		● Menos apropiado		● No apropiado			

Figura 6. Evaluación de idoneidad de las tecnologías y servicios más importantes.

En general, se observa que tecnologías como el rebombeo hidroeléctrico y el almacenamiento de energía de aire comprimido subterráneo se caracterizan por tiempos de respuesta relativamente lentos y grandes tamaños mínimos de sistema. Por lo tanto, no son adecuados para aplicaciones de respuesta rápida, como respuesta primaria y aplicaciones de consumo a pequeña escala. Los volantes y supercondensadores se caracterizan por duraciones de descarga cortas y no son adecuados para aplicaciones que requieren suministro de energía a más largo plazo. La variedad y versatilidad de las baterías les permite cubrir un amplio espectro de aplicaciones y las características de cada servicio y tipo de batería definirán su idoneidad para la aplicación.

Cabe señalar que este análisis considera los requisitos de servicio y las características de tecnologías comunes. La implementación de aplicaciones comerciales puede resultar en numerosos casos de servicios y requerimientos fuera de los rangos considerados, de la misma forma las características de las tecnologías pueden desarrollarse fuera de los rangos considerados para satisfacer los requerimientos de aplicaciones específicas. Sin embargo, no se espera que estos casos sean significativos en el caso de la mayoría de los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica existentes.

También se consideró que para una selección general preliminar de las tecnologías más adecuadas para el contexto del sector energético en México es necesario tener en cuenta, además de los aspectos técnicos específicos de la operación de tecnologías y servicios, otros



componentes tecnológicos que inciden en las posibilidades de aplicación, las cuales pueden ser más subjetivas pero pueden tener una relevancia muy importante a nivel local de cara a la implementación del almacenamiento de energía en el Sistema Eléctrico Nacional (SIN).

*Mejora potencial de la relación rendimiento-costo (madurez; habilidades necesarias)*

Los primeros aspectos técnicos de este tipo se refieren a la relación entre el potencial de mejora del desempeño y el costo de la tecnología en el mediano plazo. Para realizar un ejercicio simplificado que no restrinja la selección, se considera representativo de otros aspectos en su conjunto como la madurez de la tecnología (TRL) y las capacidades locales necesarias para su implementación y desarrollo.

Todas las tecnologías consideradas representan un nivel probado de aplicación técnica, sin embargo, es muy evidente que la investigación y el desarrollo tecnológico avanza más rápido en aquellas tecnologías que logran una mejora considerable en los costos y consecuentemente han alcanzado un nivel de comercialización de mayor escala, luego de demostrar una mayor penetración en aplicaciones alrededor del mundo, este caso es notable en las tecnologías volantes de inercia y en las baterías de iones de litio.

La tecnología de volantes de inercia aún representa altos costos de instalación y tiene una tasa de auto-descarga muy alta (15% por hora), lo que no la hace adecuada para almacenamiento de mediana-gran escala, sin embargo, se espera que la instalación se reduzca en aproximadamente 35 % para 2030, y que el número de ciclos y el tiempo de vida mejoren sustancialmente según los escenarios marcados por IRENA en su estudio de costos y mercados para 2030 (IRENA, 2017. Pág. 62). Por otro lado, su tiempo de respuesta y confiabilidad lo convierten en una opción sobresaliente para servicios que exigen una respuesta inmediata. Además, por su naturaleza mecánica, se considera que existe disponibilidad en el país para desarrollar una cadena de valor y desarrollo de investigación y tecnología en torno a los elementos de la tecnología.

Aunque existe una gran variedad de tecnologías de baterías basadas en litio con diferentes características, en general las baterías de iones de litio se han convertido rápidamente en la tecnología más importante para aplicaciones móviles (electrónica portátil y electro-movilidad), en parte porque tienen la ventaja de tener una alta densidad, un alto índice de potencia y energía en relación con otras tecnologías de baterías. También exhiben una alta velocidad y capacidad de descarga de alta potencia, excelente eficiencia de ciclo completo, una vida útil relativamente larga y una baja tasa de auto-descarga. A medida que disminuyen los costos de los sistemas de almacenamiento de energía de iones de litio, se están convirtiendo cada vez más en una opción económica para aplicaciones estacionarias, y su presencia en ese segmento está aumentando. (IRENA, 2017. Pág. 65).

En el caso de PHS y CAES no se prevén mejoras tecnológicas importantes en los próximos años en términos de coste, estructura o eficiencia de transformación. Debido a que su implementación está directamente relacionada con el sitio y sus características, es extremadamente desafiante estimar los costos de la ingeniería civil involucrada y, en general, existe una gran dependencia de las restricciones ambientales locales. Aun así, pueden ser de bajo costo unitario si se encuentran las mejores circunstancias, como tener sitios adecuados para su implementación que reduzcan la obra civil; además por su naturaleza representan en general proyectos de gran envergadura y que requieren un tiempo de construcción considerable.



Tecnología/Criterios	Mayor potencial de la relación rendimiento-costo
Almacenamiento por rebombeo hidráulico (PHS)	
Almacenamiento de energía de aire comprimido (CAES)	
Sal fundida	
Hidrógeno	
Volantes de inercia	
o Baterías a base de ácido de plomo	
o Baterías a base de litio	
o Baterías a base de sodio	
o Baterías de flujo	
o Otro tipo de bases para baterías (Zn, Ni)	
Supercondensadores	

Figura 7. Evaluación de la idoneidad del potencial para mejorar la relación rendimiento-costo.

### Consideración para México

También se tuvieron en cuenta características particulares que pueden ser importantes para el contexto del país y que pueden influir en la accesibilidad de la tecnología, sus posibilidades de implementación y los efectos económicos y sociales que podrían tener algún impacto, como el potencial de la tecnología en México, las posibilidades de desarrollar una cadena de valor y la aceptación social. Además, se consideraron factores como la experiencia en el desarrollo de proyectos hidroeléctricos (PHS) en el país, el potencial del recurso solar (sal fundida), la posible accesibilidad a los materiales de los elementos de la tecnología (volante de inercia) o la existencia de una cadena de suministro (ácido de plomo).

Tecnología/Criterios	Consideración para México
Almacenamiento por rebombeo hidráulico (PHS)	
Almacenamiento de energía de aire comprimido (CAES)	
Sal fundida	
Hidrógeno	
Volantes	
o Baterías a base de ácido de plomo	
o Baterías a base de litio	
o Baterías a base de sodio	
o Baterías de flujo	
o Otro tipo de bases para baterías (Zn, Ni)	
Supercondensadores	

Figura 8. Evaluación de idoneidad de las consideraciones especiales a nivel local.

## Costos

Debido a que las aplicaciones de almacenamiento de energía se consolidan junto con la transformación de sistemas y redes eléctricas, así como los múltiples factores que la influyen, no es fácil establecer un nivel de costos de las tecnologías en la enorme variedad de aplicaciones. Los costos de operación y mantenimiento de instalación pueden ser volátiles, especialmente en las tecnologías más emergentes, incluso un repunte tecnológico puede cambiar los escenarios de un momento a otro. A pesar de esto, es posible encontrar referencias de costos, especialmente de capital de inversión.

**Tabla 11.** Características técnicas de costos, tiempos de vida y rangos de capacidad para las diferentes tecnologías consideradas. Elaboración propia con información de: \* (Deloitte, 2015); \*\* IRENA (2017); \*\*\* Schmidt (2019).

Tecnologías	Capacidad de potencia (MW)	Ciclos (por año) o tiempo de vida	Capacidad de potencia (MW)
Almacenamiento hidroeléctrico de bombeo (PHS)	100-1000*	30-60 years*	0-100**
Almacenamiento de energía de aire comprimido (CAES)	10-1000*	20-40 years*	40-50**
Sal fundida	10-1000*	20-40 years*	34-80**
Hidrógeno	0.01-1,000*	5-30 years*	5417 (48% SD)***
Volante	0.001-1*	20,000-100,000*	1500-6000**
Ácido de plomo	0.005-100***	< 5,500***	105-475**
Batería a base de litio	0.1-100*	1000-10,000*	350-1050**
Batería de flujo	01-100*	1,000-10,000*	315-1680**
Otro tipo de bases para baterías (Na,Zn,Ni)	10-100*	2,500-4,400*	263-735**
Supercondensador	0.01-1*	10,000-100,000*	13560 (19% SD)***

Los parámetros muy importantes que pueden influir significativamente en los costos de cada tecnología son la capacidad nominal de la instalación, el tiempo de descarga, los ciclos de uso anuales y el precio de la electricidad. Sin embargo, estos variarán dependiendo de las aplicaciones, regiones y en escalas de tiempo cortas y largas mientras que, al mismo tiempo, las normas ambientales más estrictas para los costos de PHS hacen que los nuevos desarrollos sean más costosos y tomen más tiempo.

Sobre la base de estas consideraciones, cabe destacar los altos costos relacionados con las tecnologías de almacenamiento como los supercondensadores y el hidrógeno. Asimismo, tecnologías como los volantes y las baterías de flujo también representan altos costos de inversión, sin embargo, mantienen una probada factibilidad de operación manifestada en diferentes aplicaciones establecidas que contribuyen a la mejora tecnológica y predicen la reducción de costos a mediano plazo. Por otro lado, las baterías en general, y en particular las baterías de iones de litio muestran un avance vertiginoso en los últimos años que las colocan cada vez más en diferentes aplicaciones estacionarias alrededor del mundo.



Tecnología/Criterios	Costo
Almacenamiento hidroeléctrico de bombeo (PHS)	●
Almacenamiento de energía de aire comprimido (CAES)	●
Sal fundida	●
Hidrógeno	●
Volantes	●
o Baterías a base de ácido de plomo	●
o Baterías a base de litio	●
o Baterías a base de sodio	●
o Baterías de flujo	●
o Otro tipo de bases para baterías (Zn, Ni)	●
Supercondensadores	●

Figura 9. Evaluación de idoneidad de las consideraciones de costos.

### Impactos ambientales

En el caso de impactos ambientales, se considera que la reducción de emisiones de GEI es un parámetro importante en la evaluación de diferentes tecnologías. Sin embargo, este indicador está directamente relacionado con el tipo de aplicación tecnológica que puede ser desplazada en el servicio considerado, ya que se ha observado que la posibilidad de combinaciones es muy grande y la evaluación de estos impactos forma parte del trabajo planificado. Se considera que los elementos necesarios aún no están disponibles para evaluar este impacto.

Sin embargo, como se menciona en la metodología, se consideraron otros posibles impactos, tales como la generación de residuos peligrosos (baterías), la posible contaminación del suelo (ácido de plomo, CAES), el consumo de la superficie (PHS, sal fundida), o el porcentaje de los materiales incorporados a la tecnología que se pueden reciclar (volante).

Tecnología/Criterios	Impactos ambientales
Almacenamiento hidroeléctrico de bombeo (PHS)	●
Almacenamiento de energía de aire comprimido (CAES)	●
Sal fundida	●
Hidrógeno	●
Volantes	●
o Baterías a base de ácido de plomo	●
o Baterías a base de litio	●
o Baterías a base de sodio	●
o Baterías de flujo	●
o Otro tipo de bases para baterías (Zn, Ni)	●
Supercondensadores	●

Figura 10. Evaluación de idoneidad de los impactos ambientales.

## Consulta de expertos

La Figura 4 fue presentada a un grupo de expertos en almacenamiento de energía que asistieron a un primer taller, cuyo objetivo fue socializar las metas del proyecto y el enfoque técnico para desarrollar el catálogo de almacenamiento en México.

La Figura 4 se discutió durante el taller incluyendo su característica preliminar. Se recibieron comentarios importantes en relación con la atención a otros servicios de la red y criterios que podrían ser considerados para la evaluación, así mismo, se recibieron comentarios relacionados con la metodología para la asignación de colores en la evaluación. Algunas observaciones y contribuciones importantes se mencionan a continuación:

Considerar que los elementos de la electrónica y el control de potencia permiten ampliar las capacidades de la mayoría de las tecnologías;

La capacidad de reciclaje de las tecnologías debe ser un elemento importante en la evaluación de impactos ambientales;

A pesar del nivel de aplicación y madurez de las baterías de iones de litio, no se deben descartar las baterías que pueden representar aplicaciones de menor costo como las baterías de sodio;

Aunque existen limitaciones de los supercondensadores, especialmente en aplicaciones de uso intensivo de energía, se debe considerar su análisis más detallado en atención al vertiginoso desarrollo de la electrónica de potencia, que también amplía las aplicaciones de este tipo de tecnología;

Considerar la evaluación de la tecnología del hidrógeno, dado que existe una importante rama de investigación en el país, bajo la cual se exploran diferentes aplicaciones tecnológicas más allá de la consideración única de los servicios que requiere la red eléctrica nacional.

Un acuerdo alcanzado con los expertos en almacenamiento implicó la creación de grupos de trabajo coordinados por el equipo consultor sobre almacenamiento hidroeléctrico de bombeo, baterías, almacenamiento térmico, almacenamiento de energía de gas comprimido, supercondensadores, hidrógeno, volantes y servicios de red. A través de estos grupos de trabajo, se desarrollará el listado final de tecnologías de almacenamiento relevantes para el sistema eléctrico mexicano.



## References

Deloitte. (2015). *Energy storage: Tracking the technologies that will transform the power sector*. Deloitte & Touche LLP.

IRENA. (2017). *Electricity Storage and Renewables: Costs and markets to 2030*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.

Oliver Schmidt, S. M. (16 de January de 2019). Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies. (E. Inc., Ed.) *Joule*, 81-100.