Machine Translated by Google

The Future of Energy Storage

An Interdisciplinary MIT Study

Executive Summary

Machine Translated by Google

Machine Translated by Google

los futuro de Energía

Almacenamiento

UN ESTUDIO INTERDISCIPLINARIO DEL MIT

Machine Translated by Google

Otros informes en la serie MIT *Future of :*

El futuro de la energía nuclear (2003)

El futuro de la energía geotérmica (2006)

El futuro del carbón (2007)

Actualización sobre el futuro de la energía nuclear (2009)

El futuro del gas natural (2011)

El futuro del ciclo del combustible nuclear (2011)

El futuro de la red eléctrica (2011)

El futuro de la energía solar (2015)

El futuro de la energía nuclear en un mundo con restricciones de carbono (2018)

MIT Energy Initiative

Copyright © 2022 Instituto de Tecnología de Massachusetts.

Reservados todos los derechos.

En la portada se incorpora una ilustración conceptual en 3D de celdas de batería, una forma de almacenamiento de energía electroquímica. © Getty Imágenes

ISBN (978-0-578-29263-2)

Segunda versión, publicada el 3 de junio de 2022.

Machine Translated by Google

Participantes del estudio

silla de estudio

robert armstrong
Profesor Chevron, Departamento de Química Ingeniería, MIT
Director, Iniciativa de Energía del MIT

copresidente del estudio

Aún-Ming Chiang
Profesor Kyocera, Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales, MIT

Director ejecutivo

Howard Gruenspecht
Economista senior de energía, MIT Energy Initiative

Grupo de estudio

Fikile Brushett
Cecil e Ida Green Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Química, MIT

Juan Deutch
Profesor del Instituto, Departamento de Química, MIT

Seiji Engelkemier
Estudiante de doctorado, Departamento de Mecánica Ingeniería, MIT

emre gençer
Científico investigador, Iniciativa de energía del MIT

Roberto Jaffe
Profesor Morningstar de Ciencias, Departamento de Física, MIT

Pablo Joskow
Elizabeth and James Killian Profesor de Economía y Gestión, Departamento de Economía, MIT

Dharik Mallapragada
Científico investigador, Iniciativa de energía del MIT

Elsa Olivetti
Esther y Harold E. Edgerton Profesor Asociado, Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales, MIT
Codirector, Consorcio de Clima y Sostenibilidad del MIT

Richard Schmalensee
Profesor de Economía, Emérito, Departamento de Economía, MIT
Decano y Profesor Howard W. Johnson de Administración, Emérito, Sloan School of Management, MIT

Roberto Stoner
Subdirector de Ciencia y Tecnología, Iniciativa energética del MIT

Chi-Jen Yang
Ex investigador visitante, MIT Energy Initiative

Autores contribuyentes

Bjorn Brandtzaeg
Ex miembro visitante, Sloan School of Management, MIT

patricio marrón
Ex investigador científico, MIT Energy Initiative

kevin huang
Científico investigador, Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales, MIT

johannes pfeifenberger
Académico visitante, Centro de Investigación de Políticas Ambientales y Energéticas del MIT

asesores de investigación

Francisco O'Sullivan
Profesor titular, Sloan School of Management, MIT

Yang Shao-Cuerno
JR East Profesor de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica, MIT

Machine Translated by Google

Estudiantes y asistentes de investigación.

Meia Alsup

MEng, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Ciencias de la Computación ('20), MIT

Andrés Badel

SM, Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales ('22), MIT

marc barbar

Doctorado, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Ciencias de la Computación ('22), MIT

Weiran Gao

Candidato a PhD, Departamento de Química Ingeniería, MIT

Drake Hernández

SM, Tecnología y Política ('21), MIT

cristian jugue

Maestría en Ingeniería y Administración ('22), MIT

Thaneer Malai Narayanan

PhD, Departamento de Mecánica Ingeniería ('21), MIT

kara rodby

PhD, Departamento de Ingeniería Química ('22), MIT

cathy wang

SM, Tecnología y Política ('21), MIT

Machine Translated by Google

Comite de prevencion

Linda Stuntz – Presidenta
Socio, Stuntz, Davis & Staffier, PC

bahía normanda
Socio, Willkie Farr & Gallagher LLP

terry boston
Socio Estratégico, Acelerex

marca brownstein
Vicepresidente sénior, Energía, Medioambiente Fondo de Defensa

judy chang
Subsecretario de Energía, Oficina de Energía y Asuntos Ambientales de Massachusetts

Manlio Coviello
Presidente, Terna Plus

Jorge Crabtree
Director, Centro Conjunto para la Investigación del Almacenamiento de Energía (JCESR), Laboratorio Nacional de Argonne

felipe deutsch
Fundador y director ejecutivo, NGP Energy Technology Partners III

Julien Dumoulin-Smith
Director general y jefe de Investigación de Energía, Servicios Públicos y Energía Alternativa de EE. UU., Bank of America Securities

Elizabeth E. Endler
Experto científico principal sénior (electrificación, integración y almacenamiento) y asesor tecnológico principal: Energía eléctrica, Shell International Exploration & Production

andy karsner
Co-Fundador, Laboratorios Elementales

Arun Majumdar
Jay Precourt Catedrático de la Cátedra Provostial, Stanford Universidad

lucio monari
Exdirector, Infraestructura, Europa y Asia Central, Banco Mundial

Pedro J. Pizarro
Presidente y CEO, Edison Internacional

Juan Podesta
Fundador y Presidente, Junta Directiva, Center for American Progress

Praveer sinha
CEO y Director General, Tata Power Co., Ltd.

fredrick stoa
Gerente de Inversiones, Equinor Ventures, Equinor ASA

ellen williams
Distinguido profesor universitario, Universidad de Maryland

Si bien los miembros del comité asesor brindaron una perspectiva y un asesoramiento invaluables al grupo de estudio, los miembros individuales pueden tener diferentes puntos de vista sobre uno o más asuntos abordados en el informe. No se les pide que respalden individual o colectivamente los hallazgos y recomendaciones del informe.

Machine Translated by Google

Machine Translated by Google

Tabla de contenido

Prólogo y agradecimientos

Resumen ejecutivo

Capítulo 1 – Enfoque y motivación

Capítulo 2 – Almacenamiento de energía electroquímica

Capítulo 3 – Almacenamiento de energía mecánica

Capítulo 4 – Almacenamiento de energía térmica

Capítulo 5 – Almacenamiento de energía química

Capítulo 6: Modelado de almacenamiento en sistemas de alto VRE

Capítulo 7: Consideraciones para mercados emergentes y economías en desarrollo

Capítulo 8: Gobernanza de los sistemas de energía descarbonizados con almacenamiento

Capítulo 9 – Innovación y el futuro del almacenamiento de energía

Apéndices

Siglas y abreviaturas

Lista de Figuras

Lista de tablas

Glosario

Machine Translated by Google

Machine Translated by Google

Prólogo y agradecimientos

El estudio Future of Energy Storage es el noveno de la serie *Future of de* MIT Energy Initiative , cuyo objetivo es arrojar luz sobre una serie de cuestiones complejas y vitales relacionadas con la energía y el medio ambiente. Estudios previos se han centrado en la

papel de tecnologías como la energía nuclear, la energía solar, el gas natural, la geotermia y el carbón (con captura y secuestro de emisiones de dióxido de carbono), así como sistemas como la red eléctrica de EE. UU. Para todos estos estudios es fundamental comprender el papel que estas tecnologías particulares pueden desempeñar tanto en la descarbonización de los sistemas energéticos globales como en la satisfacción de las necesidades energéticas futuras. El almacenamiento de energía desempeñará un papel importante en el logro de ambos objetivos al complementar las fuentes de energía renovable variable (VRE) como la solar y la eólica, que son fundamentales en la descarbonización.

del sector eléctrico.

El estudio resultará beneficioso para una amplia gama de partes interesadas globales en el gobierno, la industria y la academia a medida que desarrollan la industria emergente de almacenamiento de energía y consideran los cambios en la planificación, supervisión y regulación de la industria de la electricidad que serán necesarios para permitir una mayor dependencia. en la generación de VRE junto con el almacenamiento. El informe es la culminación de más de tres años de investigación sobre tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica:
incluyendo oportunidades para el desarrollo de almacenamiento de larga duración y bajo costo; estudios de modelado de sistemas para evaluar los tipos y roles de almacenamiento en futuras redes VRE altamente descarbonizadas en regiones de EE. UU. y mercados emergentes, países con economías en desarrollo; e implicaciones para la planificación y regulación del sistema eléctrico.

El estudio fue guiado por un distinguido Comité Asesor externo cuyos miembros dedicaron una cantidad significativa de su tiempo a participar en múltiples reuniones; para comentar sobre nuestro análisis preliminar, hallazgos y recomendaciones; y poner a disposición expertos de sus propias organizaciones para responder preguntas y contribuir al contenido del informe. Nos gustaría agradecer especialmente el liderazgo sabio y capaz de la Presidenta del Comité, Linda Stuntz. El estudio es ciertamente mejor como resultado de este aporte reflexivo y experto.

Sin embargo, el estudio es responsabilidad del grupo de estudio del MIT; los miembros del Comité Asesor no necesariamente respaldan todos sus hallazgos y recomendaciones, ya sea individualmente o colectivamente.

El estudio El futuro del almacenamiento de energía agradece a nuestros patrocinadores: la Fundación Alfred P. Sloan y la Fundación Heising-Simons proporcionaron la financiación principal.
Los miembros de la Iniciativa de Energía del MIT, Shell y Equinor, brindaron apoyo adicional.
Al igual que con el Comité Asesor, los patrocinadores no son responsables y no necesariamente respaldan los hallazgos y recomendaciones.
Esa responsabilidad recae únicamente en el grupo de estudio del MIT.

Este estudio fue iniciado y realizado dentro de la Iniciativa Energética del MIT. Alexandra Goodwin, Asistente Administrativa Principal en MITEI, brindó apoyo tanto al equipo de estudio como al Comité Asesor. Un agradecimiento especial al equipo de eventos de MITEI, específicamente a Carolyn Sinnes, asistente administrativa; Debi Kedian, Gerente de Eventos; y

Machine Translated by Google

Kelly Hoarty, Gerente de Planificación de Eventos, por su habilidad y dedicación. Gracias también a MITEI miembros del equipo de comunicaciones Jennifer Schlick, Gerente de Proyectos Digitales; kelley travers, Especialista en Comunicaciones; turner jackson, Asistente de Comunicaciones; y Tom Melville, Director de comunicaciones. gracias adicionales a Martha Broad, Directora Ejecutiva de MITEI, por su papel fundamental en la realización del estudio. Finalmente, agradecemos a Marika Tatsutani por editar el informe con gran habilidad y dedicación.

Machine Translated by Google

Resumen ejecutivo

Este estudio interdisciplinario del MIT examina el importante papel del almacenamiento de energía en los futuros sistemas eléctricos descarbonizados que serán fundamentales para la lucha contra el cambio climático. La descarbonización profunda de la generación de electricidad junto con la electrificación de muchas actividades de uso final es necesaria para limitar el cambio climático y sus daños. Generación eólica y solar— que no tienen emisiones operativas de dióxido de carbono, han experimentado importantes reducciones de costos y se están implementando a escala mundial, es probable que proporcionen una gran parte de la generación total futura. A diferencia de los generadores tradicionales, la producción de estos recursos de energía renovable variable (VRE) depende de las condiciones climáticas, que a veces cambian rápidamente; por lo tanto, los generadores VRE no pueden enviarse para seguir las variaciones en la demanda de electricidad. El almacenamiento de electricidad, el enfoque de este informe, puede desempeñar un papel fundamental en el equilibrio entre el suministro y la demanda de electricidad y puede proporcionar otros servicios necesarios para mantener los sistemas de electricidad descarbonizados confiables y rentables. Como discutimos en este informe, el almacenamiento de energía abarca un espectro de tecnologías que se diferencian en sus requisitos materiales y su valor en los sistemas eléctricos bajos en carbono. A medida que las redes eléctricas evolucionan para incluir el despliegue a gran escala de tecnologías de almacenamiento, las políticas deben ajustarse para evitar cargas excesivas e inequitativas para los consumidores, fomentar la electrificación para la descarbonización de toda la economía y permitir un crecimiento económico sólido, en particular en los países con economías en desarrollo de mercados emergentes. . La justicia social y la equidad deben incluirse en el diseño del sistema. El horizonte de tiempo para este estudio es 2050, en consonancia con el *Futuro de* los estudios anteriores de esta serie, aunque también estamos interesados en tecnologías que se pueden implementar a escala en el plazo más cercano de 2030.

El almacenamiento de energía permite una descarbonización profunda y rentable de los sistemas de energía eléctrica que dependen en gran medida de la generación eólica y solar sin sacrificar la confiabilidad del sistema. Suponiendo que continúen las tendencias favorables de reducción de costos para las tecnologías VRE, el análisis de modelado realizado para este estudio identifica vías rentables para descarbonizar los sistemas eléctricos (reduciendo las emisiones entre un 97 % y un 99 % en relación con los niveles de 2005 en los Estados Unidos, por ejemplo) mientras se mantiene la confiabilidad de la red . La descarbonización eficiente requerirá inversiones sustanciales en múltiples tecnologías de almacenamiento de energía, así como en transmisión, generación limpia y flexibilidad de la demanda. Si las tecnologías de "emisiones negativas", es decir, tecnologías para eliminar el dióxido de carbono de la atmósfera, están disponibles, pueden proporcionar compensaciones de emisiones que permitan que pequeñas cantidades de generación de gas natural sean parte de un sistema rentable de electricidad neta cero.

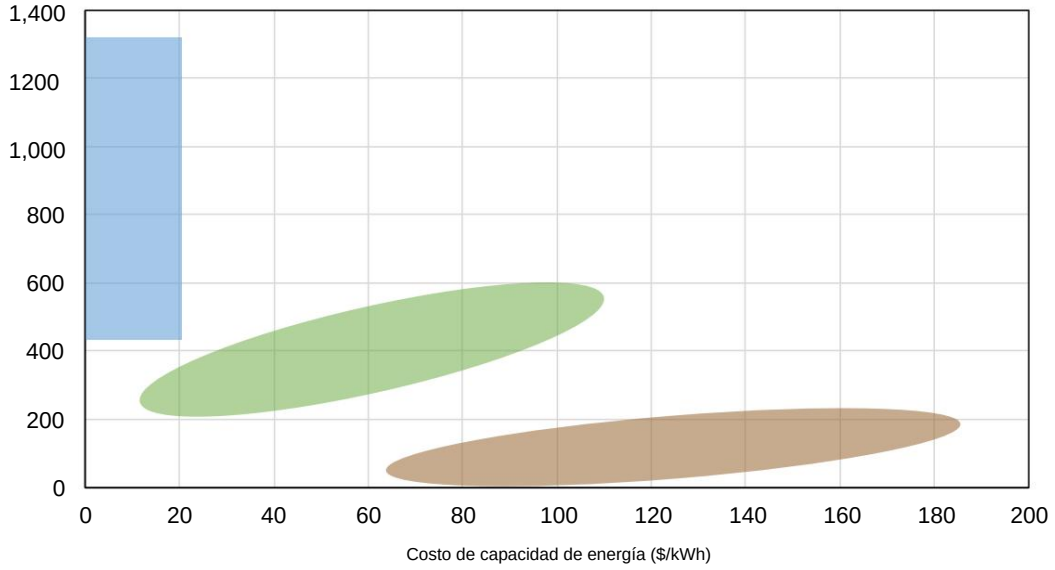
Fundamentos del almacenamiento de energía

Cuatro tipos básicos de almacenamiento de energía (electroquímico, químico, térmico y mecánico) están actualmente disponibles en varios niveles de preparación tecnológica. Todos cumplen la función principal de generar energía eléctrica durante los momentos en que la producción de VRE es abundante y los precios mayoristas son relativamente bajos y están disponibles en momentos en que la producción de VRE es escasa y los precios de venta total son relativamente altos. Esta flexibilidad proporciona una gama de beneficios a los sistemas de energía.

Una instalación de almacenamiento de energía se puede caracterizar por su máxima *potencia instantánea,* medida en megavatios (MW); su capacidad de almacenamiento de *energía ,* medida en megavatios-hora (MWh); y su *eficiencia* de ida y vuelta (RTE), medida como la fracción de energía utilizada para cargar el almacenamiento

Machine Translated by Google

Figura ES.1: Tres grupos de tecnologías de almacenamiento en función de los costes de potencia y capacidad energética



La región azul, con alta potencia y bajos costos de capacidad de energía, incluye tecnologías de almacenamiento térmico, químico (por ejemplo, hidrógeno), batería de metal-aire y bombeo hidroeléctrico. Las baterías de iones de litio caen en el área marrón, con baja potencia, pero altos costos de capacidad de energía; las baterías de flujo caen en la región verde intermedia. Además de los dos parámetros que se muestran en esta figura, otros atributos de costo y rendimiento, por ejemplo, las eficiencias de carga y descarga, también son importantes cuando se comparan las tecnologías de almacenamiento dentro y entre cada clase. El conjunto completo de características utilizadas en el modelado de sistemas se analiza en el Capítulo 6.

que se devuelve al ser dado de alta. La relación entre la capacidad de almacenamiento de energía y la potencia máxima produce la *duración de almacenamiento de una instalación,* medida en horas; este es el período de tiempo durante el cual la instalación puede entregar la potencia máxima cuando comienza con una carga completa. La mayoría de las instalaciones de almacenamiento de baterías implementadas actualmente tienen duraciones de almacenamiento de cuatro horas o menos; la mayoría de las instalaciones hidroeléctricas de almacenamiento por bombeo (PSH) existentes tienen una duración de ocho a doce horas o más.

Las tecnologías de almacenamiento también difieren en la densidad de energía, que es la cantidad máxima de energía que se puede almacenar por unidad de volumen.

Las tecnologías de baterías con alta densidad de energía son especialmente adecuadas para su uso en vehículos eléctricos (EV) y dispositivos electrónicos móviles; Sin embargo, las tecnologías con menor densidad de energía pueden utilizarse para el almacenamiento en aplicaciones de sistemas eléctricos donde el uso eficiente del espacio es generalmente menos importante. Las tecnologías de almacenamiento de energía también difieren en otros atributos, incluido el alcance de las economías de escala específicas de las instalaciones (huella geográfica, modularidad) y la medida en que su rendimiento se degrada con el uso.

Las tecnologías consideradas en este informe se dividen en tres grupos principales en función de sus costos de potencia y capacidad energética (Figura ES.1).

En general, las tecnologías con costos de capacidad de energía bajos y costos de capacidad de energía altos (el área azul en la figura) son más adecuadas para aplicaciones de almacenamiento de mayor duración (hasta varios días) y ciclos de carga y descarga menos frecuentes; Estos incluyen opciones de almacenamiento térmico, químico, de batería de metal-aire y de hidrobomba. Las tecnologías en el área marrón, incluidas las baterías de iones de litio, se adaptan mejor a aplicaciones de menor duración (unas pocas horas) y ciclos más frecuentes. Las tecnologías con capacidades intermedias, incluidas las baterías de flujo, se encuentran en el área verde.

Machine Translated by Google

Tecnologías de almacenamiento del sistema eléctrico

El estudio examina las tecnologías de almacenamiento de electricidad a electricidad en cuatro categorías: electroquímica, térmica, química y mecánica.

No catalogamos, y mucho menos evaluamos, todas las opciones dentro de cada una de estas categorías; más bien, nos enfocamos en ejemplos de tecnologías de almacenamiento en cada categoría y buscamos resaltar problemas que se aplican a un amplio conjunto de tecnologías dentro de estas categorías. Algunas de las tecnologías que consideramos, como las baterías de iones de litio, la energía hidroeléctrica de almacenamiento por bombeo y algunas opciones de almacenamiento térmico, están probadas y disponibles para implementación comercial. Otros requerirían más investigación, desarrollo y demostración, y es posible que no estén disponibles comercialmente a escala hasta los años 2030 o 2040. La tabla ES.1 resume nuestra evaluación de la disponibilidad de diversas tecnologías de almacenamiento y tecnologías y prácticas de apoyo al almacenamiento a corto plazo (para 2030).

Todas las tecnologías que consideramos en este informe podrían estar disponibles comercialmente para 2050.

La innovación exitosa para la energía y muchas otras tecnologías relacionadas con la fabricación generalmente pasa por cinco etapas: creación de ideas , ingeniería de I+D a escala ➔ piloto, implementación ➔ de demostración de ➔ tecnología. ➔

La tabla ES.1 indica la etapa actual de innovación para varias tecnologías de almacenamiento. El sector privado ha proporcionado capital de riesgo significativo para tecnologías de almacenamiento en general y para baterías de iones de litio utilizadas en vehículos en particular. Como se discutió en este estudio, el desarrollo de baterías EV ha mejorado significativamente las perspectivas para el almacenamiento de sistemas eléctricos de corta duración. Hasta ahora, las tecnologías de almacenamiento de larga duración no han experimentado una ayuda similar por parte de otros impulsores del mercado. Si bien el valor del almacenamiento de larga duración (>12 horas) es bajo cuando la penetración de VRE es baja, las tecnologías de almacenamiento de larga duración claramente se vuelven más valiosas a medida que los requisitos de descarbonización se vuelven más estrictos y crece la dependencia de la generación de VRE. Esto es especialmente cierto si los operadores de red están excluidos del uso de generación a base de gas natural, con o sin captura y almacenamiento de carbono, para proporcionar capacidad de equilibrio durante períodos prolongados de suministro para la generación de VRE o durante niveles inusualmente altos de demanda debido a eventos climáticos extremos prolongados. El valor que podría proporcionar el almacenamiento de larga duración en un sistema eléctrico altamente descarbonizado aboga por un mayor apoyo federal a varios tipos de opciones de almacenamiento de larga duración, según la etapa de innovación que hayan alcanzado las diferentes tecnologías.

El enfoque de la política actual en los objetivos de descarbonización a un plazo relativamente corto impulsa la atención pública y privada hacia la demostración y el despliegue de tecnología aguas abajo que involucran tecnologías relativamente maduras. El Departamento de Energía de EE. UU. (DOE) puede desempeñar un papel útil en esta área, pero su participación debe reflejar dos lecciones importantes aprendidas de los esfuerzos de demostración e implementación anteriores. En primer lugar, el Congreso debe permitir más proyectos de demostración de tecnología conjunta con la industria, sin las restricciones del Reglamento Federal de Adquisiciones y otras reglas que restringen el desarrollo y la demostración de tecnología en términos comerciales. El propósito de la inversión pública en la demostración de tecnología y la actividad de implementación temprana es difundir el conocimiento, lo cual es inconsistente con políticas como exigir costos compartidos a cambio de derechos de propiedad intelectual.

En segundo lugar, los esfuerzos para acelerar el despliegue de cualquier tecnología comercial deben basarse en incentivos y mecanismos que recompensen el éxito pero que no interfieran en la gestión del proyecto. La administración Biden ha propuesto créditos fiscales para una amplia gama de tecnologías de almacenamiento, además de créditos fiscales para la transmisión y varias tecnologías de generación limpia, incluidas la eólica y la solar. A diferencia de las tecnologías de generación de electricidad, en las que los pagos basados en el rendimiento, como los créditos fiscales a la producción, pueden vincularse directamente a las medidas de producción,

Machine Translated by Google

Tabla ES.1: Resumen de los hallazgos sobre el estado actual de innovación de tecnologías de almacenamiento de energía seleccionadas

Tecnología	Estado actual de innovación					Capítulo
Almacenamiento electroquímico						2
baterías de iones de litio		2		4	5	2
Baterías de flujo (acuosas inorgánicas)		2		4	5	2
Baterías de flujo (orgánicas acuosas)	1	2	3			2
baterías NaS				4	5	2
Baterías de metal-aire		2	3			2
Suministro de materiales críticos (metales y tierras raras)	1	2	3			2
Reciclaje de baterías	1	2	3	4		2
segundo uso de la bateria	1	2				2
Electrónica de potencia avanzada		2	3	4		
Almacenamiento hidroeléctrico bombeado				4	5	3
Almacenamiento térmico		2	3	4		4
Hidrógeno						5
Producción, transporte, almacenamiento.	1	2		4		5
Generación de **H2 : fotoeléctrica, reformación de gases a muy alta temperatura, electrólisis avanzada**		2				5

1 Creación, estudio y análisis de ideas: patrocinadores públicos y privados
2 I+D—universidad, laboratorio nacional y ejecutores del sector privado
3 Ingeniería a escala piloto
4 Demostración y prueba
5 Implementación: depende del progreso y las condiciones del mercado.
En los capítulos enumerados en la columna de la derecha se encuentra una discusión más detallada.

El apoyo basado en el rendimiento para las tecnologías de energía que no son de generación, como el almacenamiento, debe basarse en medidas de prueba operativas y de desarrollo preestablecidas.

Almacenamiento electroquímico

Los sistemas de almacenamiento electroquímico, que incluyen tipos conocidos de baterías, así como nuevas variantes de baterías discutidas en este estudio, generalmente tienen una densidad de energía más alta que los sistemas de almacenamiento térmico y mecánico, pero una densidad de energía más baja que los sistemas químicos. La eficiencia de ida y vuelta para el almacenamiento de la batería varía ampliamente, desde un 95 % para las químicas de iones de litio (Li-ion) hasta un 40 % para las químicas de metal-aire.

Una huella compacta y la independencia de los recursos hidrológicos y geológicos hacen de las baterías una tecnología versátil y altamente escalable que se puede dimensionar para un rango de aplicaciones, desde centrales eléctricas hasta usos residenciales. Nuestro estudio arroja varias conclusiones clave.

Las baterías de iones de litio poseen alta densidad de energía, alta densidad de potencia y alta eficiencia de ida y vuelta, lo que facilita su uso casi omnipresente en vehículos eléctricos y su uso generalizado en aplicaciones de almacenamiento de sistema eléctrico de corta duración (normalmente 4 horas o menos). El papel dominante de las baterías de iones de litio en el mercado de vehículos eléctricos en rápido crecimiento ha atraído una inversión significativa del sector privado y está respaldando la rápida expansión de la capacidad de fabricación de baterías en los Estados Unidos (actualmente, la mayor parte de esta inversión proviene de empresas extranjeras). El costo y los límites en la disponibilidad de los materiales clave que se utilizan actualmente en la fabricación de baterías han puesto un límite a

Machine Translated by Google

La batería de iones de litio cuesta y puede limitar el despliegue futuro, lo que inspira un cambio hacia productos químicos que utilizan más elementos abundantes en la tierra. Otros avances que se persiguen enérgicamente para los componentes de las baterías de iones de litio también contribuirán a mejorar los costes y el rendimiento. Con estas tendencias, las baterías de iones de litio seguirán siendo una tecnología líder para los vehículos eléctricos y para el almacenamiento de corta duración, pero es poco probable que sus costos de capacidad de almacenamiento bajen lo suficiente como para permitir una adopción generalizada para el sistema eléctrico de larga duración (> 12 horas). aplicaciones

Para permitir el almacenamiento económico de energía de larga duración (> 12 horas), el DOE debe apoyar la investigación, el desarrollo y la demostración para promover tecnologías alternativas de almacenamiento electroquímico que se basen en materiales abundantes en la tierra. Los requisitos de costo, vida útil y escala de fabricación para el almacenamiento de energía de larga duración favorecen la exploración de tecnologías electroquímicas novedosas, como las baterías de flujo redox y de metal-aire que utilizan materiales económicos de almacenamiento de carga y diseños de batería que son más adecuados para el almacenamiento de energía de larga duración. aplicaciones de duración. Si bien varias tecnologías electroquímicas novedosas se han mostrado prometedoras, las brechas de conocimiento restantes con respecto a los desafíos científicos, de ingeniería y de fabricación clave sugieren un gran valor para el apoyo gubernamental concertado. La innovación en estas tecnologías se está buscando activamente en otros países, especialmente en China.

Almacenamiento de energía térmica

El almacenamiento de energía térmica (TES) tiene atributos adecuados para el almacenamiento de larga duración, incluida la capacidad de almacenar calor de manera efectiva en materiales de bajo costo. Este informe analiza varias estrategias genéricas de TES que reflejan diversos grados de preparación tecnológica.

Un posible enfoque de TES a corto plazo se centra en reducir el costo de convertir el calor en energía eléctrica, el componente principal de la Costo del sistema TES, mediante la reutilización de turbinas de vapor en las centrales eléctricas existentes y la adición de almacenamiento térmico y nuevos generadores de vapor en lugar de las calderas de combustibles fósiles existentes. Esta modernización se puede hacer hoy utilizando tecnologías disponibles comercialmente, y puede ser atractiva para los propietarios de plantas y las comunidades locales como una forma de utilizar activos que de otro modo serían abandonados a medida que los sistemas eléctricos se descarbonizan.

Almacenamiento de energía química: Hidrógeno

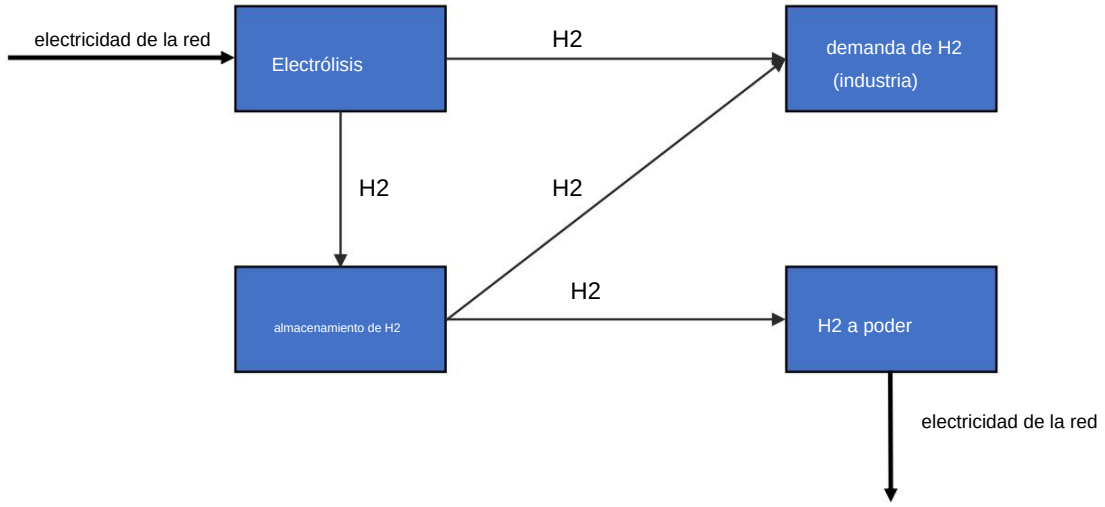
El hidrógeno se considera ampliamente como un medio de almacenamiento de energía química líder porque puede producirse directamente a partir de electricidad en un solo paso y consumirse como combustible para producir energía o como materia prima o fuente de calor para otros procesos industriales. Nos centramos en el hidrógeno en esta sección de almacenamiento de productos químicos.

El papel del hidrógeno como una forma de almacenamiento de energía para el sector eléctrico probablemente dependerá de la medida en que se utilice hidrógeno en la economía en general, lo que a su vez será impulsado por los costos futuros de producción, transporte y almacenamiento de hidrógeno, y por la ritmo de la innovación en las aplicaciones de uso final del hidrógeno.

Actualmente, el hidrógeno se produce, transporta y vende como materia prima para numerosos procesos industriales. Hoy en día, la tecnología dominante para la producción de hidrógeno se basa en combustibles fósiles y produce emisiones de carbono. La capacidad de producir hidrógeno bajo en carbono mediante la división del agua (también conocida como electrólisis) utilizando electricidad de red baja en carbono puede respaldar la descarbonización en sectores de uso final como la industria y el transporte, así como en el sector energético. La figura ES.2 muestra cómo el hidrógeno producido a través de la electrólisis puede servir como combustible bajo en carbono para la industria, así como para la generación de electricidad durante los períodos en que la generación de VRE es baja. El uso de electrolizadores como carga despachable para el sistema de energía también podría reducir los costos de descarbonización del sistema de energía al aumentar la utilización de la capacidad de VRE recursos.

Machine Translated by Google

Figura ES.2: Ilustración del acoplamiento intersectorial (energía-industria) de hidrógeno



El acoplamiento conduce a reducciones de costos a través de una mayor utilización de activos de energía renovable variable y la operación de electrolizadores como cargas despachables.

Apoyamos el esfuerzo que el DOE está liderando para crear una estrategia nacional que aborde la producción, el transporte y el almacenamiento de hidrógeno. En particular, la capacidad de las tuberías de transmisión de gas natural existentes para transportar hidrógeno sin sufrir fragilización, ya sea a presiones reducidas o si el hidrógeno se mezcla con gas natural u otros compuestos, sigue siendo una pregunta abierta que merece un estudio respaldado por el gobierno por parte del DOE y los EE. UU. Departamento de transporte.

Un paso importante en esta dirección es el llamado en la legislación reciente para la creación de al menos cuatro centros de hidrógeno.

Almacenamiento mecánico

La energía eléctrica se puede convertir en varias formas de energía mecánica, como la energía potencial gravitatoria y la energía cinética; la energía eléctrica también se puede utilizar para comprimir un gas como el aire. Algunas de estas formas de energía mecánica son adecuadas para el almacenamiento de energía a gran escala y de larga duración. Como categoría, el almacenamiento de energía mecánica incluye una amplia variedad de tecnologías. Una característica común de todas estas tecnologías, sin embargo, es que su densidad de energía es mucho más baja que la densidad de energía de las tecnologías de almacenamiento químico o electroquímico. En consecuencia, los sistemas de almacenamiento de energía mecánica tienden a tener grandes huellas y requieren ubicaciones geológicamente favorables:
por lo tanto, no son muy adecuados para su uso en instalaciones de pequeña escala.

La energía hidroeléctrica de almacenamiento por bombeo (PSH) almacena energía en la energía potencial del agua bombeada cuesta arriba. PSH es una tecnología madura y ampliamente implementada que representa más del 90 % de la capacidad funcional de almacenamiento de energía a escala de red que existe actualmente, tanto a nivel mundial como en los Estados Unidos. Sin embargo, el despliegue de PSH se ha desacelerado significativamente en los Estados Unidos y en muchos otros países desde la década de 1990 (la notable excepción es China). Esta tendencia refleja, entre otros factores, la reducción del valor del arbitraje energético intradía como resultado del mayor uso de generación flexible a gas. Además, los proyectos de PSH tienen altos costos iniciales y requisitos inflexibles de tamaño y ubicación; Históricamente, estos proyectos también han experimentado largos períodos de construcción y grandes sobrecostos.

Machine Translated by Google

Si bien no es estrictamente una tecnología de almacenamiento de electricidad a electricidad, los sistemas hidroeléctricos convencionales existentes con depósitos de almacenamiento podrían desempeñar un papel más importante en el equilibrio de la oferta y la demanda en los sistemas de electricidad que dependen en gran medida de la generación de VRE. Donde exista un potencial significativo para desempeñar este papel, los planificadores del sistema deben considerar opciones para aumentar la cantidad de agua que se retiene detrás de las represas para usarla en el equilibrio de los sistemas eléctricos.

Los sistemas de almacenamiento de energía de aire comprimido (CAES) almacenan aire presurizado en cavidades subterráneas o tanques sobre el suelo; algunos sistemas CAES también almacenan el calor que se genera cuando se comprime el aire. Esta tecnología ha sido ampliamente discutida como una opción potencial de almacenamiento de energía a escala de red, pero enfrenta importantes obstáculos para su implementación a escala. Aunque las estimaciones de costos para CAES están sujetas a múltiples incertidumbres, las estimaciones de costos de energía para esta tecnología son generalmente más altas que las estimaciones para otras tecnologías de almacenamiento de energía que se espera que estén disponibles en el futuro.

La ubicación conjunta de los sistemas de almacenamiento de energía con las plantas de energía existentes que se están retirando podría reducir los costos de almacenamiento al permitir la reutilización de las interconexiones de red existentes y, en algunos casos, otros componentes de la planta de energía.

El uso de las interconexiones existentes ahorraría tiempo y costos. Además, como se señaló anteriormente, las turbinas existentes se pueden reutilizar en sistemas de almacenamiento térmico que realimentan las turbinas existentes utilizando calor o combustible de cero emisiones. El DOE debe investigar el costo y los impactos en el sistema de las tecnologías de almacenamiento térmico y otras opciones que ofrecen la posibilidad de reutilizar los activos existentes, así como la aceptación social de dichas estrategias de reutilización por parte de las comunidades vecinas, y debe patrocinar proyectos de demostración cuando corresponda.

Sistemas de electricidad eficientes de alto VRE con almacenamiento: modelado de resultados e implicaciones para la gobernanza y la política

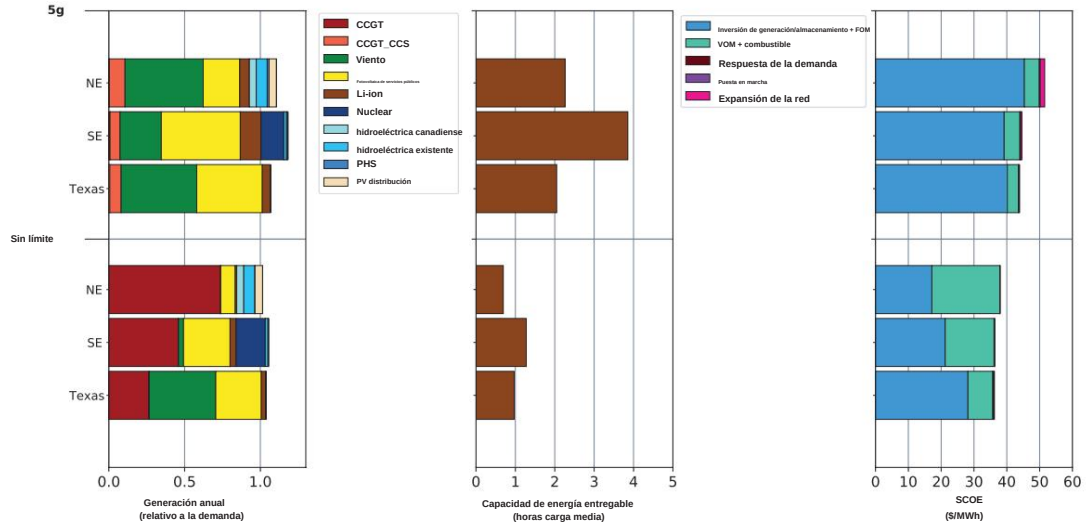
Esta sección examina las funciones potenciales del almacenamiento en el contexto de un país desarrollado y en el contexto de un país con economía en desarrollo de mercado emergente. Los contextos de estos dos países se ilustran con los resultados de tres regiones diferentes en los EE. UU. y la India, respectivamente.

Resultados del modelo para un país desarrollado: tres regiones de EE. UU.

Nuestro modelo para el sector eléctrico de EE. UU. se centró en tres regiones: el noreste (Nueva York y Nueva Inglaterra), el sureste y Texas para sistemas en gran parte "greenfield" en 2050. Estas regiones difieren significativamente en sus perfiles de demanda de electricidad, recursos eólicos y solares. y disponibilidad de energía hidroeléctrica y recursos nucleares existentes. Estas diferencias afectan tanto la combinación de generación de menor costo en ausencia de restricciones de emisiones como el costo de lograr diferentes grados de descarbonización. La Figura ES.3 muestra proyecciones modeladas para la generación anual, la capacidad de energía entregable y el costo del sistema de electricidad para cada región en 2050 bajo dos escenarios de política: sin restricción de carbono y emisiones restringidas a 5 gramos de dióxido de carbono por kilovatio-hora (gCO2/kWh). Si la demanda de electricidad de 2050 se mantiene igual que el nivel de 2018, reducir la intensidad de carbono promedio del sector eléctrico de EE. UU. a 5 gCO2/kWh reduciría las emisiones de 2050 en un 99,2 % en relación con 2005. Por otro lado, si el uso de electricidad crece de tal manera que la demanda en 2050 es mayor que en 2018, como se proyectó en el escenario de demanda de electricidad utilizado para modelar los impactos del almacenamiento de energía para este estudio (Mai et al. 2018), una intensidad de carbono promedio en todo el sector de EE. UU. de 5 gCO2/kWh generaría un 98,7 % de reducción en las emisiones del sector eléctrico en relación con 2005. Los resultados ilustrativos en la Figura ES.3 provienen de escenarios que asumen solo baterías de iones de litio y almacenamiento hidroeléctrico bombeado

Machine Translated by Google

Figura ES.3: Generación anual relativa a la demanda



Generación anual en relación con la demanda, capacidad de energía entregable del almacenamiento (medida en horas de descarga a carga media) y costo promedio de electricidad del sistema (SCOE) en el noreste (NE), sureste (SE) y Texas en 2050. Resultados del modelado se muestran para un escenario sin límite de emisiones (mitad inferior de cada gráfico) y para un escenario de política con un límite de intensidad de emisiones de 5 gCO2/kWh (mitad superior de cada gráfico) (tenga en cuenta que el escenario de política asume la descarbonización a un nivel que reduce las emisiones del sector eléctrico de EE. UU. en aproximadamente un 99 % en relación con 2005). SCOE incluye inversión total anualizada; O&M fijo; costos operativos de generación, almacenamiento y transmisión; y cualquier penalización de energía no servida. La intensidad de las emisiones bajo el caso de política "Sin límite" para cada región es la siguiente: NE: 253 gCO2/kWh, SE: 158 gCO2/kWh, Texas: 92 gCO2/kWh. Para la región Nordeste, "Eólica" representa la suma de la generación en tierra y en alta mar. En esta ilustración, las baterías de iones de litio son la única tecnología nueva desplegada con fines de almacenamiento de energía en el sector eléctrico. El informe completo analiza los resultados del modelado para una amplia gama de tecnologías de almacenamiento, de las cuales las baterías de iones de litio son solo un ejemplo.

PHS = Almacenamiento hidroeléctrico por bombeo. VOM = Costo variable de operación y mantenimiento.

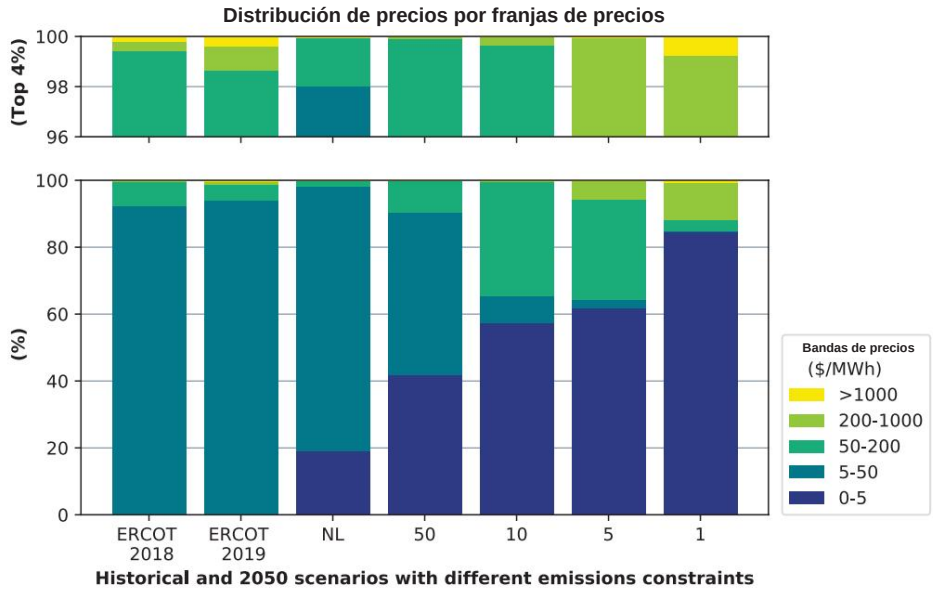
están disponibles; nuestro modelo de regiones de EE. UU. (discutido en el Capítulo 6) examina una amplia gama de otras tecnologías de almacenamiento.

La capacidad de las tecnologías de almacenamiento para sustituir o complementar esencialmente todos los demás elementos de un sistema de energía (incluida la generación, transmisión y respuesta a la demanda), junto con los impactos inciertos del cambio climático en la demanda y el suministro de electricidad, significa que se necesitan herramientas analíticas más sofisticadas. necesario para planificar, operar y regular los sistemas de energía del futuro y para garantizar que estos sistemas sean confiables y eficientes. Las áreas de enfoque importantes incluyen la estabilidad y el despacho del sistema (incluida la habilitación de la participación y compensación de distrib activos de almacenamiento y generación (PV) utilizados en el despacho del sistema y los mercados mayoristas), la adecuación de los recursos y el diseño de tarifas minoristas. El desarrollo de nuevas herramientas analíticas debe ir acompañado de apoyo adicional para la dotación de personal complementaria y los programas de mejora de las capacidades en las agencias reguladoras. Este esfuerzo debe ser liderado por el DOE en cooperación con operadores de sistemas independientes y organizaciones regionales de transmisión (ISO/RTO).

La distribución de los precios mayoristas por hora o el valor marginal de la energía cambiará en los sistemas de energía a granel profundamente descarbonizados, con muchas más horas de precios cero o muy bajos y más horas de precios altos en comparación con los mercados mayoristas actuales.

Machine Translated by Google

Figura ES.4: Precio mayorista marginal horario de energía para Texas



Precio mayorista marginal por hora de energía para Texas bajo varios escenarios de emisiones que van desde sin límite (NL, 3ra barra desde la izquierda) hasta 1 gCO2/kWh (barra más a la derecha). Las bandas de precios se basan en el costo marginal conocido de varias tecnologías de generación; ampliamos el 4% superior de las bandas de precios para mostrar las distribuciones de precios en ese extremo. Las distribuciones históricas de precios en ERCOT se muestran como referencia.
A los efectos de esta figura, asumimos únicamente el almacenamiento de la batería de iones de litio. El efecto de incluir otras tecnologías de almacenamiento en estos resultados se analiza en la Sección 6.3.4.

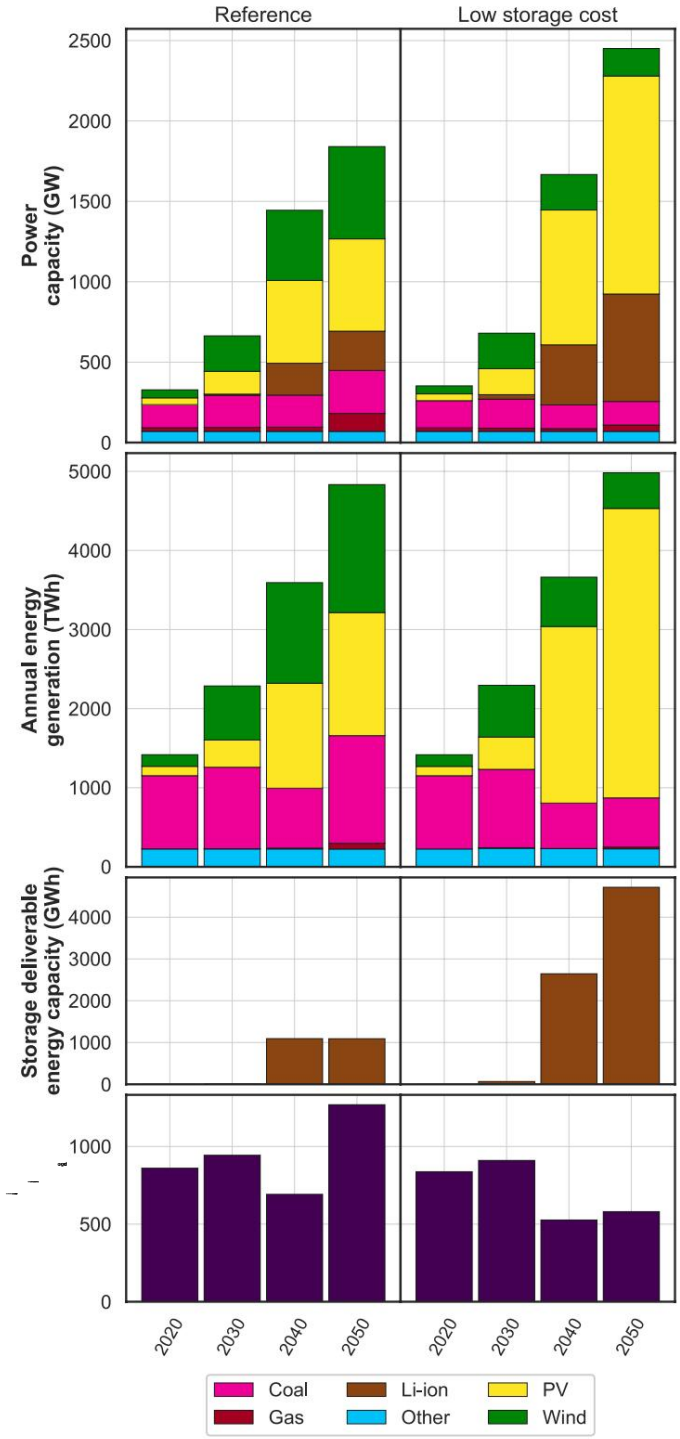
Esto se debe a que los sistemas de energía a granel con almacenamiento dominantes de VRE tendrán costos fijos (de capital) relativamente altos y costos operativos marginales relativamente bajos en comparación con los sistemas de energía a granel actuales, que dependen en gran medida de generadores térmicos. La Figura ES.4 compara la distribución de los precios de electricidad mayoristas históricos por hora para 2018 y 2019 en el sistema ERCOT, que cubre casi todo el estado de Texas, con escenarios de 2050. Las barras representan las distribuciones de precios para los casos de modelado de Texas sin límite y con restricciones de carbono. Una mayor dependencia de la generación VRE, con un costo marginal cero, aumenta en gran medida el porcentaje de horas en las que los precios, representados por los costos marginales del sistema en nuestro modelo, están por debajo de $5 por MWh.

Este efecto aumenta a medida que la restricción de carbono se vuelve más estricta (es decir, las emisiones permitidas se reducen). Durante las horas de precio más alto, que se muestran en la parte superior de las barras y en el sección detallada de la figura, los precios modelados están significativamente por encima de los del mercado ERCOT actual.

La combinación de costos de capital relativamente altos y muchas más horas cuando los precios son muy bajos creará desafíos financieros tanto para la generación como para el almacenamiento de VRE, particularmente porque es probable que los reguladores continúen limitando (como lo hacen en la actualidad) los precios extremadamente altos que, de lo contrario, podrían respaldar los costos. recuperación. Los patrones futuros de los precios de la electricidad al por mayor y el objetivo de descarbonizar otros sectores a través de la electrificación con electricidad descarbonizada también refuerzan el beneficio de adoptar opciones de gestión de carga y precios minoristas que recompensan a todos los consumidores por cambiar los usos de electricidad de los momentos en que los precios mayoristas altos indican escasez a los tiempos cuando los precios al por mayor bajos indican abundancia.

Machine Translated by Google

Figura ES.5: Impacto de las proyecciones de costos de almacenamiento de iones de litio en la evolución del sistema de energía a granel rentable en la India



Capacidad instalada (1ra fila), generación anual de energía (2da fila), capacidad de almacenamiento de energía (3ra fila) y emisiones anuales de CO2 (4ta fila). Los resultados de la columna de la izquierda corresponden a un caso de referencia, que utiliza una estimación media de los costos futuros de capital de la batería de iones de litio. La columna de la derecha asume una trayectoria de bajo costo para los futuros costos de capital de la batería de iones de litio.

Machine Translated by Google

La expansión de la transmisión, que permite una mayor implementación de VRE en ubicaciones con recursos de VRE de mayor calidad y mejora la integración de VRE al equilibrar la intermitencia de los recursos en las áreas conectadas y suavizar los efectos de las diferencias geográficas en la oferta y la demanda de VRE, también es importante para una descarbonización rentable. . La probabilidad actual de que los proyectos de transmisión rentables para llevar la generación desde áreas con recursos VRE de alta calidad a los principales centros de carga enfrenten demoras prolongadas o un posible rechazo sugiere la necesidad de cambios legales y reglamentarios para reducir las barreras a la expansión de la transmisión. Un déficit en la nueva capacidad de transmisión puede dar lugar a un papel más importante para el almacenamiento, así como a costos más altos en los futuros sistemas de electricidad descarbonizados.

Resultados del modelo para un mercado emergente, país de economía en desarrollo: India

Los países de mercados emergentes y economías en desarrollo dependientes del carbón que carecen de acceso a abundante gas de bajo costo o infraestructura de gas, como India, representan un mercado futuro muy grande e importante para las aplicaciones de sistemas eléctricos de tecnologías de almacenamiento de energía. El modelado para este estudio sugiere que el almacenamiento de energía se implementará predominantemente en el nivel de transmisión, con importantes aplicaciones adicionales dentro de las redes de distribución urbana. El crecimiento económico general y, en particular, la rápida adopción del aire acondicionado serán los principales impulsores del despliegue del almacenamiento de energía. Suponiendo que los costos de la tecnología continúen disminuyendo, encontramos que la generación y el almacenamiento de VRE compiten favorablemente con el nuevo carbón desde el punto de vista de los costos en India a mediano y largo plazo, pero las plantas de carbón existentes persisten sin el precio del carbono, como se muestra en el panel izquierdo de la Figura ES. 5.

Los resultados del modelado para un escenario que asume la disponibilidad de almacenamiento de bajo costo y tecnología de generación de VRE en India se muestran en el panel derecho de la Figura ES.5. Estos resultados apuntan a reducciones significativas tanto en el costo del sistema1 como en las emisiones de dióxido de carbono modeladas del sistema eléctrico de la India en relación con las proyecciones de referencia (capturadas en el panel izquierdo). Las reducciones en el costo del sistema y las emisiones de CO2 ocurren ya sea que haya o no topes o impuestos sobre las emisiones de carbono. Este resultado destaca el beneficio ambiental global de menores costos para el almacenamiento de electricidad.

Estudio adicional

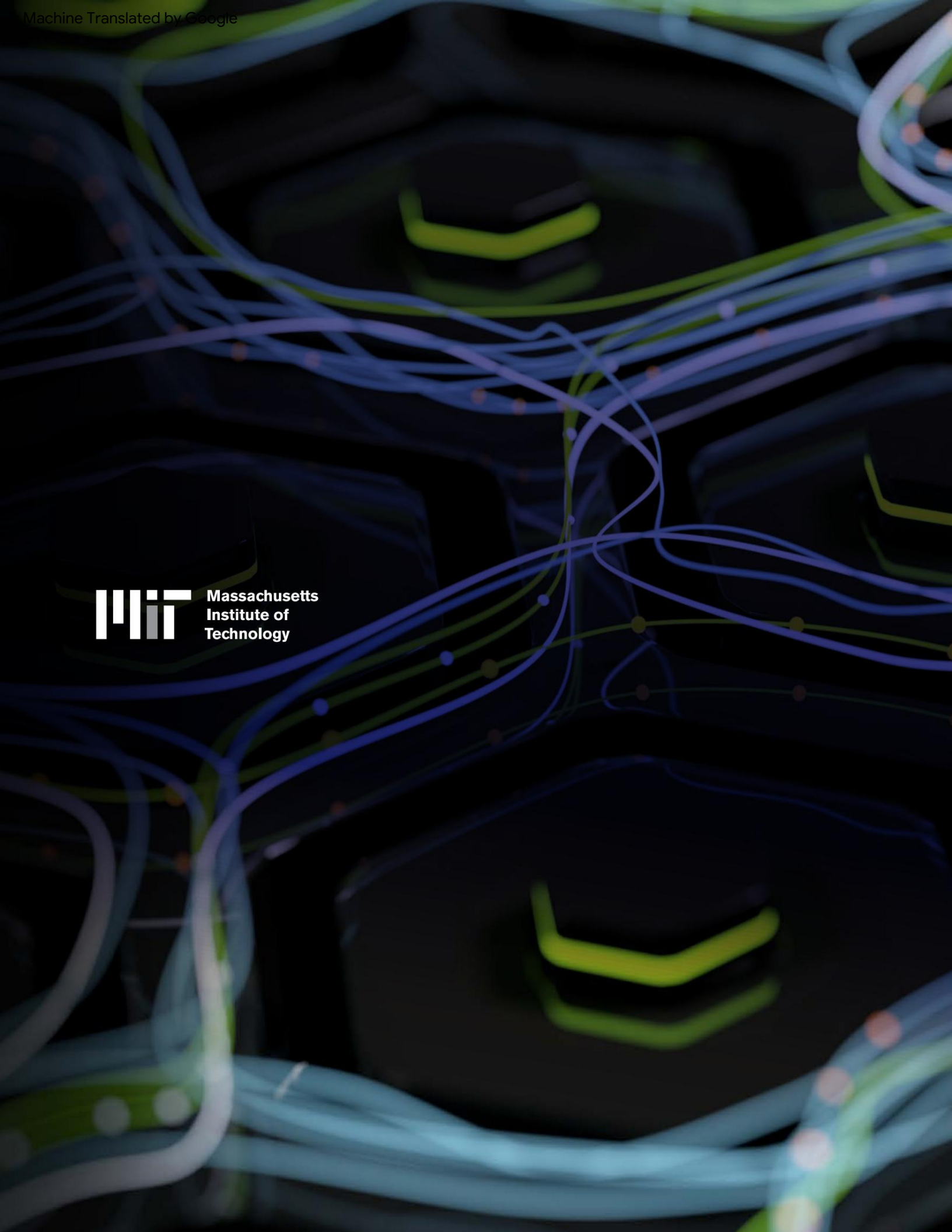
Varios temas relacionados con el almacenamiento más allá de los abordados en este estudio merecen atención. Estos incluyen: (1) tendencias de la cadena de producción y suministro, y sus impactos en términos de disponibilidad y costo de las tecnologías de almacenamiento de energía y competitividad de EE. UU.; (2) la relación entre la estabilidad de un marco de política económica y regulatoria para la descarbonización de toda la economía y el tiempo requerido para lograr un sector eléctrico con cero emisiones netas de carbono; (3) el establecimiento de expectativas para el reciclaje y la reutilización de baterías al final de su vida útil; (4) identificación de aspectos ambientales, de salud y de seguridad de sistemas específicos de almacenamiento de electricidad; y (5) el margen disponible en la práctica para la flexibilidad de carga y la respuesta a la demanda para reducir las necesidades de almacenamiento en la red y los costos asociados.

Referencias

Mai, T., P. Jadun, J. Logan, C. McMillan, M. Muratori, D. Steinberg, L. Vimmerstedt, R. Jones, B. Haley, B. Nelson. (2018). *Estudio de Futuros de Electrificación: Escenarios de Adopción de Tecnología Eléctrica y Consumo de Energía para los Estados Unidos.* Golden, CO: Laboratorio Nacional de Energía Renovable.

1 Los costes medios del sistema resultantes de la electricidad en 2040 y 2050 se reducen en un 22 % y un 39 %, respectivamente.

Machine Translated by Google



Massachusetts
Institute of
Technology