INFORME RESUMIDO DEL PROGRAMA JUNIO 2024

Implementación acelerada del almacenamiento de energía en los países de RELAC

Renovables en América Latina y el Caribe (RELAC)[1] es una iniciativa regional de América Latina y el Caribe (LAC) creada en 2019 en el marco de la Cumbre de Acción Climática de las Naciones Unidas, con el objetivo de alcanzar al menos al menos el 73 % de la capacidad instalada de energía renovable y el 80 % de la generación eléctrica total de la región a partir de energías renovables para 2030.[2]

16 países son miembros (**Figura 1**), y otros están en conversaciones para unirse. RELAC proporciona:

1. Apoyo para abordar las necesidades técnicas y financieras para aumentar la penetración de las energías renovables.
2. Apalancamiento de recursos financieros para apoyar las necesidades de desarrollo de capacidades y la implementación de planes de expansión de energías renovables.
3. Intercambio de conocimientos a través del aprendizaje entre pares y mejores prácticas en la integración de energías renovables a la red eléctrica.

Figura 1. Mapa de países de RELAC. *Imagen de Nate Blair y Andrew Bilich, NREL.*

Antecedentes

Lograr una generación de energía renovable del 80 % o más para 2030 requerirá que los países RELAC gestionen muchos desafíos técnicos complejos. La integración y el uso efectivos de tecnologías de almacenamiento de energía serán un factor clave para equilibrar los niveles crecientes de energía renovable variable, proporcionar servicios auxiliares y garantizar la estabilidad, el tiempo de actividad, la confiabilidad y la resiliencia de la red eléctrica.

En la última década, los costos de almacenamiento de energía en baterías disminuyeron un 88 % (un descenso mayor que el de cualquier otra tecnología de energía renovable durante el mismo período) y se prevé que esos costos disminuyan aún más en las próximas décadas (**Figura 2**).[3] Si bien el sector de almacenamiento de energía ha logrado avances significativos en mercados como Estados Unidos y Europa, en los países de RELAC, es todavía incipiente.

De hecho, casi el 93 % de los más de 15 GW de capacidad acumulada de almacenamiento de energía global desplegada entre 2015 y 2021 se desplegó en China, Estados Unidos, Europa, Corea del

[1] Ver https://hubenergia.org/en/relac.
[2] El objetivo fue actualizado por los países miembros en noviembre de 2023.
[3] "Estudio sobre los futuros del almacenamiento de energía" del NREL (2022); Disponible en: https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/81779.pdf

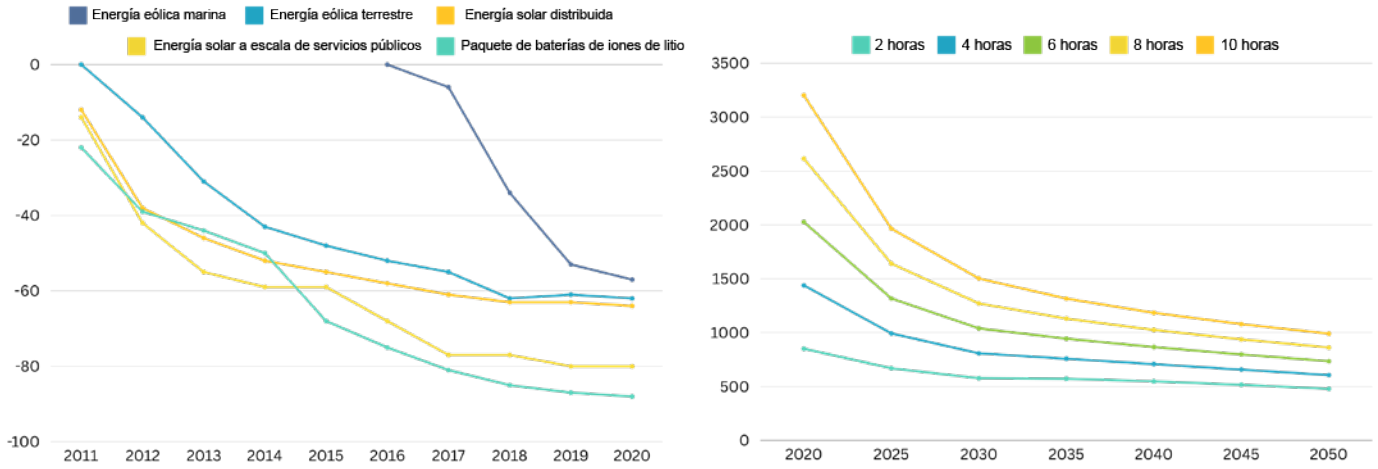

Figura 2. Disminución de los costos del almacenamiento de energía y de las energías renovables

Sur y Japón, lo que dejó solo 1,1 GW en el resto del mundo (incluidos los países de RELAC).[4] Un informe del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) de 2021 estimó que hay 111 MW de capacidad de almacenamiento instalados en países de LAC y se planean 87 MW adicionales, muy por debajo de la capacidad necesaria para alcanzar los objetivos de energía renovable.[5] Esto pone de relieve una necesidad crítica de desarrollar capacidad técnica, conciencia sobre nuevas tecnologías y conocimientos de vanguardia de la industria para fomentar un entorno general propicio para el almacenamiento de energía en LAC. Estos factores acelerarán el despliegue y el uso óptimos del almacenamiento de energía, y maximizarán el potencial regional de energía renovable.

Reseña del programa

Para abordar la necesidad regional de planificación del almacenamiento de energía y apoyo regulatorio, el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL), en colaboración con la Alianza de Acción Climática Global (GCAP) y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), implementó un programa para apoyar el desarrollo de planes de acción de almacenamiento de energía específicos para los países RELAC, con el fin de impulsar la inversión y la acción política que acelera el despliegue del almacenamiento de energía en toda la región.

Los objetivos del programa eran:

1. Mejorar la capacidad técnica para planificar, implementar, integrar y operar soluciones de almacenamiento de energía para partes interesadas clave y tomadores de decisiones en los países de RELAC.
2. Apoyar la planificación para una mayor ambición en la formulación de políticas y la planificación del almacenamiento de energía en todos los países de RELAC.
3. Proporcionar asistencia técnica personalizada para ayudar a movilizar y acelerar la implementación de proyectos, iniciativas o regulaciones específicas de almacenamiento de energía en los países de RELAC
4. Construir una red de partes interesadas en el almacenamiento de energía en todo RELAC para apoyar el intercambio de conocimientos entre pares y aprender de los éxitos regionales.
5. Crear materiales grabados que puedan compartirse con otras personas en toda la región de LAC y ayudar a aumentar el aprendizaje entre pares y la transferencia de conocimientos.

Para lograr estos objetivos, el proyecto implementó tres componentes interrelacionados:

- **Serie de talleres sobre almacenamiento de energía:** La serie de talleres técnicos de creación de capacidad se centró en capacitar a partes interesadas clave y tomadores de decisiones de los países de RELAC en un amplio espectro de temas relacionados con el almacenamiento de energía.
- **Visita técnica a NREL:** Visita al campus del NREL para facilitar el diálogo regional en persona, profundizar el compromiso con los expertos en almacenamiento del NREL, profundizar en los planes de acción específicos de cada país y generar conciencia sobre otras áreas de investigación y herramientas de energía renovable del NREL.
- **Asistencia técnica a nivel nacional para almacenamiento de energía:** Asistencia técnica directa para fortalecer y avanzar en los planes de acción de almacenamiento de energía de los países.

Los enfoques e impactos específicos de cada componente se analizan a continuación.

Serie de talleres

En el transcurso de seis meses en 2023, RELAC llevó a cabo una serie de siete talleres técnicos sobre un amplio espectro de temas relacionados con el almacenamiento de energía. A los siete talleres técnicos asistieron 96 partes interesadas (en su mayoría ministerios de energía, reguladores y otros funcionarios encargados de formular políticas) en 14 países de RELAC (**Tabla 1**).

[4] Agencia Internacional de Energía. 2022. "Adiciones anuales de almacenamiento de baterías a escala de red". Última modificación el 30 de agosto de 2022.. https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/annual-grid-scale-battery-storage-additions-2016-2021.

[5] Graham, Nate, Edwin Malagón, Lisa Viscidi y Ariel Yépez. 2021. *Estado de carga: almacenamiento de energía en América Latina y el Caribe*. Washington D.C.: BID. https://publications.iadb.org/publications/english/viewer/State-of-Charge-Energy-Storage-in-Latin-America-and-the-Caribbean.pdf.

Tabla 1. Resumen de los talleres de almacenamiento de energía de RELAC

Taller	Resumen
Taller 1: Resumen de aplicaciones técnicas y planificación del almacenamiento de energía *24 de abril de 2023*	Descripción general de las tecnologías y los conceptos de almacenamiento de energía, las herramientas de almacenamiento y análisis del NREL, y las capacidades de soporte, las fases de implementación del almacenamiento, el papel del almacenamiento en el sistema eléctrico y las hojas de ruta para incorporar tecnologías de almacenamiento de energía para fortalecer la penetración de las energías renovables. (44 participantes)
Taller 2: Plantas de energía virtuales, almacenamiento a largo plazo y experiencias de EE.UU. Operador del Sistema CAISO *16 de mayo de 2023*	Descripción general de las plantas de energía virtuales y almacenamiento a largo plazo, incluidos aplicaciones y requisitos para un entorno regulatorio propicio y análisis profundo de cómo el Operador Independiente del Sistema de California (CAISO) utiliza tecnologías de almacenamiento de energía para mejorar la flexibilidad del sistema eléctrico en California. (43 participantes)
Taller 3: Análisis detallado de las herramientas de modelado de almacenamiento de energía *6 de junio de 2023*	Análisis detallado del Modelo Asesor del Sistema (SAM)[7] del NREL y cómo se puede utilizar para modelar sistemas de almacenamiento de energía independientes y acoplados a fotovoltaicos, así como del Modelo de Optimización de Implementación de Almacenamiento (SDOM)[8] del NREL y cómo modelar el almacenamiento de larga duración y optimización de almacenamiento para la planificación del sistema eléctrico. (42 participantes)
Taller 4: Economía con sistemas de almacenamiento: Estudios de caso del BID sobre inversiones y proyectos de almacenamiento de energía *27 de junio de 2023*	Descripción general de la economía del almacenamiento de energía con un enfoque específico en la financiación de recursos de almacenamiento de baterías. Estudio de caso sobre las inversiones en almacenamiento de energía del BID: sistemas híbridos de almacenamiento de energía en Bolivia. (42 participantes)
Taller 5: Planificación de cuestiones regulatorias y normas técnicas *25 de julio de 2023*	Estudio de caso sobre la prestación de servicios energéticos auxiliares mediante almacenamiento de baterías en las Bahamas; visión general de consideraciones sobre el almacenamiento de energía a gran escala en el contexto de la planificación de recursos; estudio de caso sobre la solución de problemas regulatorios para el almacenamiento de energía y la congestión de redes en Colombia. (40 participantes)
Taller 6: Marcos regulatorios y servicios auxiliares *8 de agosto de 2023*	Debate sobre los entornos habilitadores para el almacenamiento de energía en países de RELAC, incluyendo una actividad guiada para que los asistentes evalúen sus propios países utilizando la evaluación de preparación para el almacenamiento de energía.[9] Modelado de servicios auxiliares en el almacenamiento de energía utilizando la plataforma Sienna del NREL[10]; estudio de caso del marco regulatorio de almacenamiento de energía en Barbados (Comisión de Comercio Justo de Barbados). (43 participantes)
Taller 7: Regulaciones, políticas y códigos/normas para la gestión de los sistemas de almacenamiento de energía al final de su vida útil *28 de agosto de 2023*	Visión general de la herramienta preliminar del BID para evaluar marcos regulatorios para el almacenamiento de energía; análisis exhaustivo de consideraciones regulatorias y políticas para la reutilización y el manejo al final de la vida útil de las baterías solares en Estados Unidos; reutilización, reciclaje y seguridad de las baterías de ion litio. (59 participantes)

Casi todos los participantes destacaron la alta calidad de la serie de talleres y dijeron que se centró en temas que eran relevantes e interesantes para su trabajo y los desafíos de su país. La mayoría de los participantes (>90 %) también indicaron una base de conocimiento y capacidad mejoradas o muy mejoradas en una variedad de temas técnicos sobre almacenamiento de energía (**Figura 3**).[6] En última instancia, los seminarios web no solo ayudaron a desarrollar esta capacidad técnica y competencia, sino que también informaron el desarrollo de los planes de acción finales para cada país y el apoyo técnico asociado.

Visita Técnica

En octubre de 2023, 24 participantes de 11 países de RELAC, así como personal del BID y de la Alianza Energética Global para las Personas y el Planeta (GEAPP), asistieron a una visita intensiva de una semana al campus de NREL en Colorado (**Figura 4**). La visita incluyó recorridos por las instalaciones y laboratorios de investigación del NREL, así como presentaciones técnicas de expertos del NREL sobre una variedad de temas relacionados con el almacenamiento de energía, como: regulación del almacenamiento, cooperación regional, almacenamiento de energía para servicios de transmisión y auxiliares, almacenamiento de larga duración, hidrógeno, entre otros. También se abordaron temas del sector más amplio de la energía limpia, como sistemas de energía eólica/solar, carga e integración de vehículos eléctricos, edificios inteligentes, información de la red y operaciones del sistema, y agrivoltaica.

Además, los países tuvieron la oportunidad para interactuar con expertos de NREL para desarrollar y perfeccionarsus planes de acción de almacenamiento de energía de cada país y proyectos de asistencia técnica de alcance/avance (consulte la sección de asistencia técnica a continuación). Al final de la visita, los 11 países desarrollaron y perfeccionaron sus planes de acción específicos para el almacenamiento de energía, incluidas áreas de acción prioritarias, que luego presentaron a sus pares regionales.

[6] Encuesta de participación realizada en septiembre de 2023. 37 respuestas (tasa de respuesta del 39 %), en su mayoría de participantes que asistieron a varios talleres.
[7] Ver https://sam.nrel.gov/.
[8] Ver https://github.com/NREL/SDOM.
[9] Ver https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/78197.pdf.
[10] Ver https://www.nrel.gov/analysis/sienna.html.

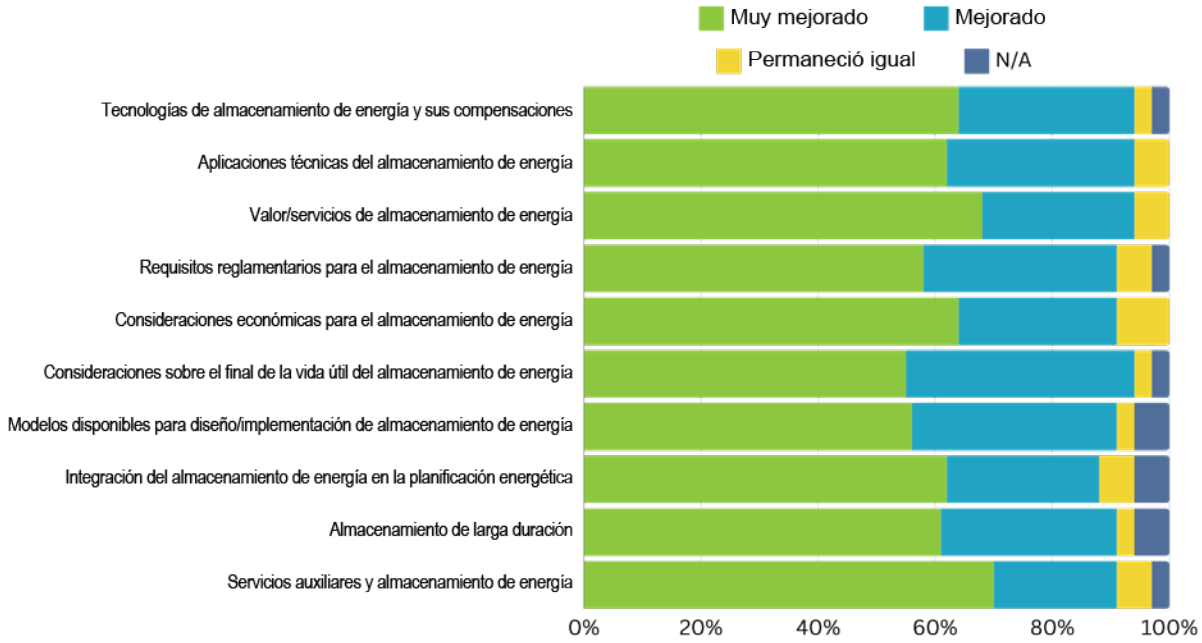

Figura 3. Cambio en el conocimiento/la conciencia sobre el almacenamiento de energía. *Imagen de Andrew Bilich, NREL.*

Estos planes de acción destacaron varias áreas comunes de enfoque en los países, que incluyen la modificación de los códigos de red para apoyar mejor el almacenamiento de energía, evaluaciones tecnoeconómicas y modelado de la integración del almacenamiento de energía en las redes nacionales, desarrollo de capacidades para evaluar el almacenamiento de energía en la planificación energética nacional, y apoyo para los procesos de adquisición y solicitud de propuestas para el almacenamiento de energía. Los planes de acción de cada país se resumen en la **Tabla 2**.

En general, los participantes destacaron las presentaciones sobre almacenamiento de energía e investigación, el apoyo personalizado de los expertos y los recorridos por las instalaciones del NREL como los elementos más valiosos de la visita del NREL. Entre otros beneficios, los participantes destacaron que la visita les ayudó a identificar nuevos conceptos, ideas y oportunidades de almacenamiento de energía para incorporar en los planes de acción; a comprender las brechas y necesidades de almacenamiento de energía en sus países; a familiarizarse con nuevas herramientas; a desarrollar nuevos contactos; a recibir apoyo para modelos o proyectos piloto; y a ampliar/aclarar el alcance de la colaboración con NREL y la amplia red de RELAC.[11]

Asistencia técnica

NREL también brindó apoyo de asistencia técnica a los países de RELAC que participaron en el programa de almacenamiento de energía. En general, la asistencia técnica se centró en el soporte directo para modelado y análisis de almacenamiento de energía (incluyendo el fortalecimiento de capacidades en plataformas de modelado) o en las condiciones regulatorias habilitadoras para el almacenamiento de energía, como se detalla a continuación.

Estimaciones del potencial de almacenamiento de energía

NREL utilizó SDOM,[12] una herramienta de modelado de código abierto para evaluar la operación y despliegue de almacenamiento de energía, para desarrollar modelos iniciales para Uruguay, Perú y El Salvador con el fin de evaluar diferentes escenarios de almacenamiento de energía que apoyen la integración de energías renovables, reduzcan los vertimientos de energía y aumenten la estabilidad de la red hasta 2050 (Figura 5). Los escenarios modelados se desarrollaron utilizando aportes clave de los ministerios de energía individuales de los respectivos países.

Para este análisis inicial, se ignoraron las importaciones/exportaciones para facilitar una evaluación simplificada del potencial de energía renovable y almacenamiento, manteniendo todas las demás variables constantes. El aumento en la generación de energías renovables puede potencialmente permitir una mayor exportación a redes vecinas, pero a medida que esas redes también

Figura 4. Participantes de RELAC para la visita al sitio de NREL

[11] Puede encontrar un video resumen de la visita en: https://www.youtube.com/watch?v=BEzB6ieWcyg.
[12] Ver https://github.com/NREL/SDOM.

Tabla 2. Planes de acción nacionales sobre almacenamiento de energía

País	Resumen de elementos de acción prioritaria para el almacenamiento de energía
Barbados	• Modificar el código de red para respaldar mejor el almacenamiento de energía y garantizar normas y requisitos de comunicación clave para la modernización de la red. • Evaluar los proyectos de almacenamiento de energía existentes para analizar los beneficios netos del almacenamiento de energía y resaltar oportunidades para mejorar el marco regulatorio para proyectos futuros. • Apoyar el desarrollo de un proceso de adquisición de almacenamiento de energía.
Bolivia	• Desarrollar una propuesta para integrar el almacenamiento de energía al marco regulatorio de Bolivia. • Crear conciencia y divulgación entre las partes interesadas del sector energético sobre el valor del almacenamiento de energía, en particular para la prestación de servicios auxiliares.
Chile	• Modelar y evaluar configuraciones potenciales de almacenamiento de energía identificadas en los escenarios de planificación energética a largo plazo de Chile, utilizando la plataforma SDOM. • Desarrollar capacidad técnica para modelar tecnologías de almacenamiento de energía. • Desarrollar una red de aprendizaje para compartir mejores prácticas para la regulación del almacenamiento de energía.
Costa Rica	• Desarrollar un modelo de simulación que represente la demanda, la generación y la capacidad de transmisión para evaluar el potencial del almacenamiento de energía para abordar los desafíos de la red y la integración de energías renovables.
República Dominicana	• Analizar la situación de referencia para la integración del almacenamiento de energía en la red eléctrica, incluidos los servicios auxiliares, anomalías del sistema, deslastre de carga y regulaciones. • Apoyar el modelado y la planificación de posibles proyectos de almacenamiento de energía para abordar los desafíos del sistema. • Refinar el marco regulatorio existente para permitir mejor el almacenamiento de energía.
Ecuador	• Actualizar los códigos de red a nivel nacional y de Galápagos para permitir la participación técnico/económica de almacenamiento de la energía. • Establecer un modelo para un proyecto piloto de almacenamiento de energía para apoyar la integración de energías renovables y aumentar la capacidad de transmisión entre Ecuador y Perú.
El Salvador	• Desarrollar capacidad técnica para modelar y planificar el almacenamiento de energía. • Evaluar y adaptar los marcos regulatorios, particularmente la Ley General de Electricidad, para ayudar a promover la participación de actividades de almacenamiento de energía. • Actualizar las regulaciones operativas del mercado mayorista, así como el código de red nacional para permitir la interconexión, la participación y la remuneración del almacenamiento de energía y otras tecnologías. • Integrar el almacenamiento de energía en los procesos de planificación energética a largo plazo, comenzando con el análisis de las necesidades y capacidades potenciales de almacenamiento en todo El Salvador, particularmente para reducir las restricciones.
Guatemala	• Desarrollar capacidad para integrar el almacenamiento de energía, particularmente el almacenamiento en baterías, en la planificación energética nacional para informar a la próxima generación del Plan de Expansión de Energías Renovables de Guatemala. • Apoyar el diseño de licitaciones públicas considerando la posible integración del almacenamiento de energía.
Honduras	• Completar un proyecto de solicitud de propuestas para una consultoría técnica para revisar el marco regulatorio existente y desarrollar regulaciones para el almacenamiento de energía. • Crear capacidad técnica y soporte de modelado (por ejemplo, utilizando la herramienta REopt®[13]) para ampliar las minirredes como parte del Plan Nacional de Electrificación Rural.
Perú	• Realizar una evaluación tecnoeconómica y un análisis de escenarios para evaluar la viabilidad de integrar sistemas de almacenamiento de energía en la red eléctrica nacional. • Adaptar los Códigos de Red Nacionales y desarrollar una propuesta de marco regulatorio o modificación de la normativa existente para viabilizar la implementación de sistemas de almacenamiento. • Desarrollar capacidad técnica relacionada con la regulación y operación de tecnologías de almacenamiento de energía.
Uruguay	• Apoyar la integración de las energías renovables y la estabilidad de la red con modelado y análisis de escenarios del potencial de almacenamiento de energía, particularmente para centros de carga y equilibrio de las fluctuaciones de la energía hidroeléctrica. • Explorar el potencial de almacenamiento a largo plazo, en particular hidrógeno y energía hidroeléctrica por bombeo. • Actualizar la regulación energética para permitir que el almacenamiento de energía participe en los mercados y servicios de red. • Alinear posibles incentivos y políticas de almacenamiento con la Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde de Uruguay.

[13] Ver https://reopt.nrel.gov/tool.

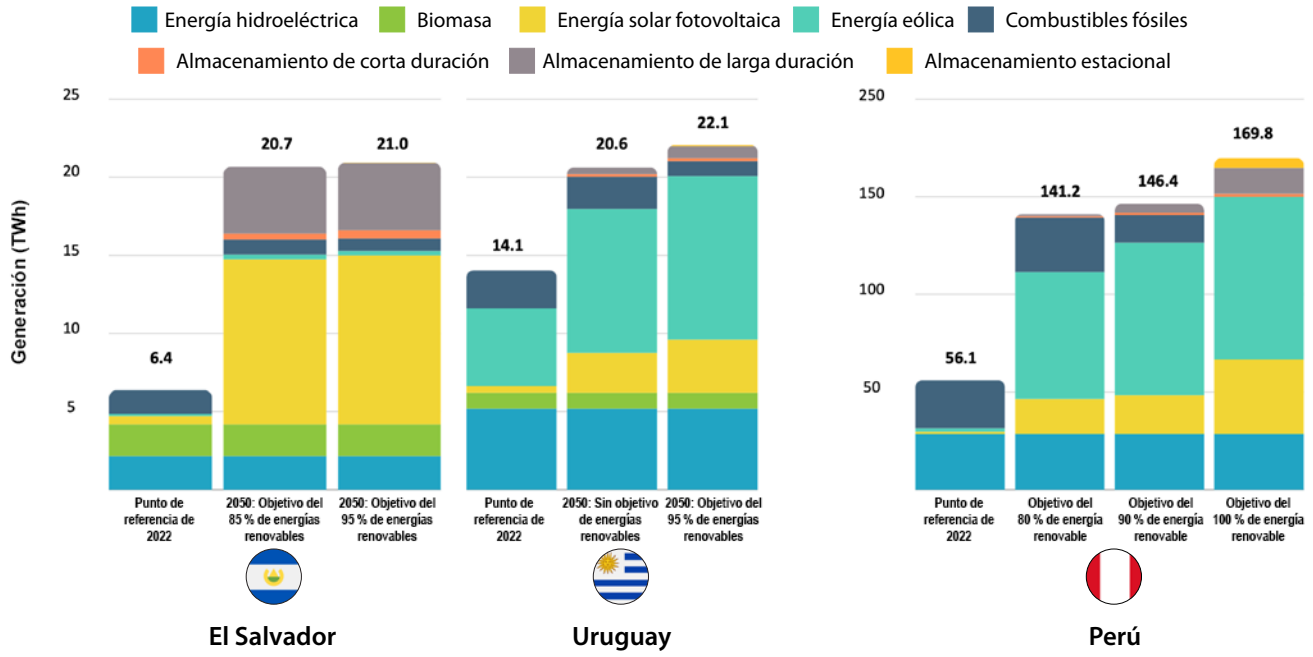

Figura 5. Generación a red por recurso, escenario y país.
Imagen de Omar José Guerra Fernández y Andrew Bilich, NREL

están desarrollando más energías renovables, se presenta una mayor oportunidad. para las importaciones de energías renovables cada vez más baratas, especialmente durante los períodos de exceso estacional. Estas dinámicas son complejas y requerirán pruebas de escenarios y modelos regionales más profundos. Además, SDOM no considera restricciones de transmisión (red eléctrica de cobre), por lo que las restricciones de transmisión podrían aumentar la necesidad de tecnologías de almacenamiento de energía.

Con base en estos aportes y limitaciones a nivel de país, SDOM modela diferentes combinaciones de generación y tasas de expansión de capacidad bajo diferentes objetivos de energía renovable hasta 2050 (**Figura 5**) y considera el potencial de los siguientes tipos de almacenamiento de energía:

- **Corta duración:** Tecnologías de almacenamiento con altos costos relacionados con la energía pero los costos más bajos relacionados con la energía que generalmente brindan almacenamiento de energía en el rango de 1 a 10 horas. Esta tecnología se basa en proyecciones de baterías de iones de litio, pero también podría representar tipos de baterías alternativas que podrían alcanzar valores óptimos de costo y rendimiento.
- **Larga duración:** Tecnologías de almacenamiento con costos energéticos elevados pero costos relacionados con la potencia más bajos, que típicamente ofrecen almacenamiento de energía en el rango de 10 a 100 horas. Se consideran dos opciones genéricas: (1) tecnologías con costos más bajos de potencia y energía, pero con eficiencias de ida y vuelta más bajas (por ejemplo, almacenamiento adiabático de aire comprimido o almacenamiento térmico bombeado); y (2) tecnologías con costos más altos de capacidad y energía, pero también con eficiencias más altas (por ejemplo, almacenamiento hidroeléctrico bombeado o baterías de flujo de mayor duración).
- **Opción estacional:** Tecnologías de almacenamiento con costos relacionados con la potencia más altos, costos muy bajos relacionados con la energía y eficiencias de ida y vuelta bajas (por ejemplo, hidrógeno o tecnologías similares), que típicamente proporcionan almacenamiento de energía de 100 horas o más.

En los escenarios de energía renovable más altos según definidos por cada país respectivo (Perú: 100 %, Uruguay: 95 %, El Salvador: 95%), se necesita una capacidad de almacenamiento sustancial para respaldar el despliegue de energía renovable, especialmente cuando se pasa a escenarios de energía 100 % renovable en los que el almacenamiento estacional se vuelve aún más crítico (por ejemplo, Perú en la Figura 6). Ambos tipos de almacenamiento de energía y sus patrones de utilización dependen significativamente de la combinación de recursos y, en particular, de la cantidad de generación solar y eólica. En general, el almacenamiento de corta duración se utiliza para el traslado intradiario de excedentes de energías renovables variables, el almacenamiento de larga duración sigue un patrón similar, pero se utiliza tanto para el traslado intradiario como entre días de excedentes de energías renovables variables y no descarga completamente cada día como las tecnologías de corta duración. El almacenamiento estacional permite trasladar el excedente renovable de una temporada a otra. En sistemas dominados por energía solar como El Salvador, se necesita más almacenamiento de corta duración, y ese despacho de almacenamiento tiende a seguir un patrón de carga solar por la tarde y descarga tarde en la noche o temprano en la mañana. Para sistemas dominados por el viento como Uruguay, los requisitos de almacenamiento son más aleatorios, dependiendo de la variabilidad del viento (**Figura 6**).

En todos los países, el despliegue de almacenamiento ayuda a mitigar el posible vertimiento de energía renovable variable, pero en los escenarios de integración alta de energía renovable variable (por ejemplo, más del 95 %), las estimaciones de vertimientos aún se situaban en un rango del 7 % al 14 % de la generación total de energía renovable variable.

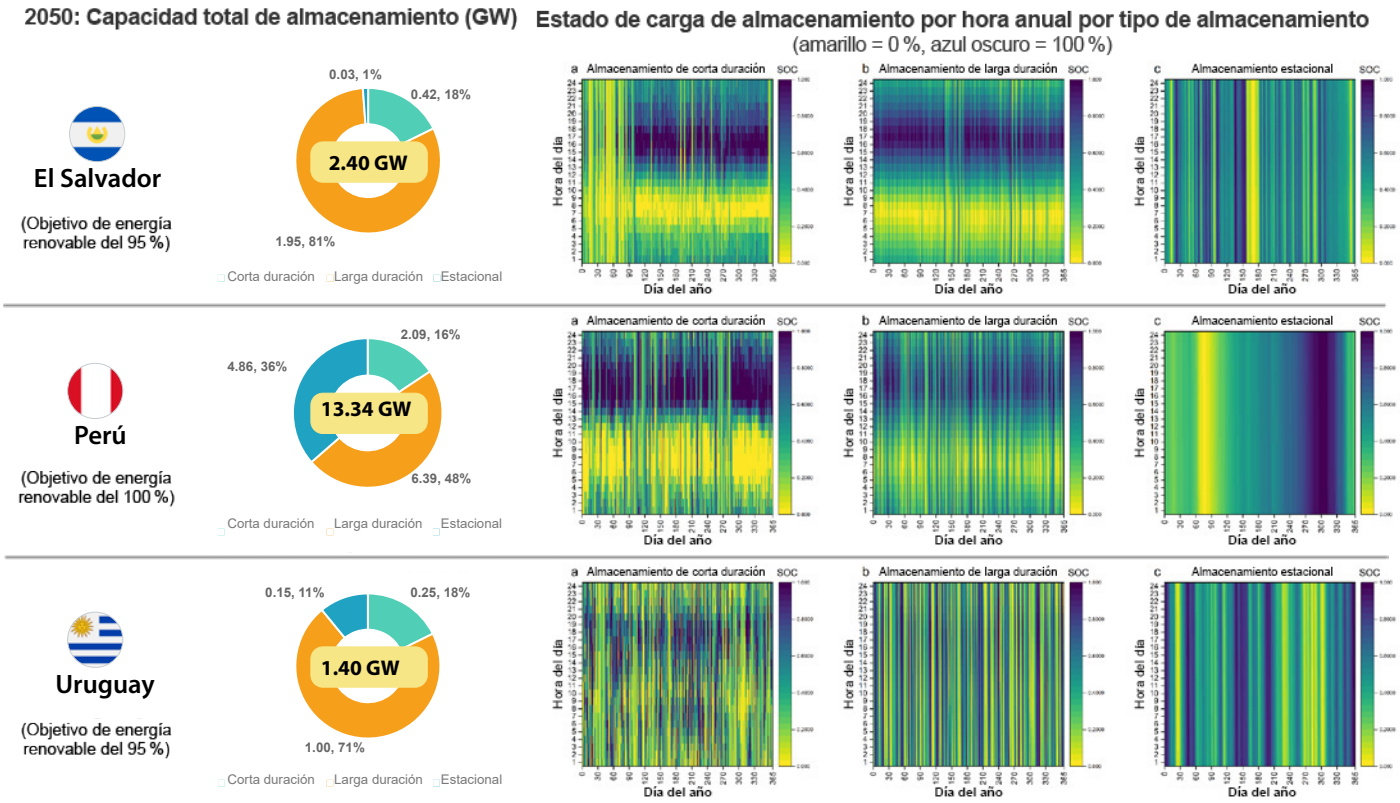

Figura 6. Capacidad de almacenamiento estimada por SDOM y estado de carga anual por hora para diferentes tipos de almacenamiento de energía implementado (escenarios de alta energía renovable) *Imagen de Omar José Guerra Fernández y Andrew Bilich, NREL*

El NREL ha desarrollado análisis y reportes más detallados para cada país, pero las estimaciones iniciales del SDOM destacan una necesidad potencial clave de almacenamiento de energía para apoyar las transiciones energéticas en los países de RELAC. Para facilitar completamente el despliegue de almacenamiento de energía, los países necesitarán desarrollar y perfeccionar sus marcos regulatorios y políticas existentes para permitir el almacenamiento de energía (consulte la sección de Marcos Regulatorios para Almacenamiento de Energía a continuación para ejemplos de apoyo en RELAC).

Además, la modelización inicial de SDOM puede informar otros modelos más detallados del sistema eléctrico (por ejemplo, el modelo Sienna[14] de código abierto de NREL para oportunidades en el sistema eléctrico y el Modelo Asesor del Sistema de NREL para análisis tecnoeconómico de proyectos específicos) para evaluar cómo y dónde desplegar proyectos específicos de almacenamiento de energía según las necesidades/restricciones de los sistemas eléctricos específicos de cada país, así como las especificaciones técnicas y viabilidad económica de esos proyectos de almacenamiento de energía (consulte la sección de Modelización de Integración de Almacenamiento de Energía para ejemplos).

Modelado de integración de almacenamiento de energía

Para evaluar más a fondo la integración del almacenamiento de energía, NREL desarrolló un marco de modelado simplificado utilizando su plataforma Sienna de código abierto, un marco modular para el modelado dinámico de sistemas de energía. NREL utilizó los paquetes de software Sienna\Data y Sienna\Ops para desarrollar el conjunto de datos y realizar las simulaciones de energía (**Figura 7**).

NREL utilizó Sienna para modelar el almacenamiento de energía (y el desarrollo de capacidades asociado) en tres países:

- **Costa Rica:** Marco nacional para evaluar el despliegue del almacenamiento de energía para la optimización de las energías renovables
- **Ecuador:** Despliegue de almacenamiento de energía en la interconexión entre Perú y Ecuador para acercar la capacidad de transmisión actual de alrededor de 40 MW a su capacidad de transmisión nominal original de 100 MW.
- **Honduras:** Despliegue de hasta 50 MW de almacenamiento de energía para mejorar la confiabilidad de la red, la integración de energías renovables y la planificación energética regional.

Si bien el apoyo al modelado para Ecuador y Honduras está en curso, el análisis y la capacitación para Costa Rica se han completado, como se detalla a continuación.

En su borrador inicial del plan de acción, el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) destacó varias áreas prioritarias para el almacenamiento de energía en Costa Rica, incluido el modelado y la planificación de los recursos de almacenamiento de energía, particularmente para comprender cuándo y dónde implementar el almacenamiento de energía en la red costarricense para apoyar

[14] Ver https://www.nrel.gov/analysis/sienna.html.

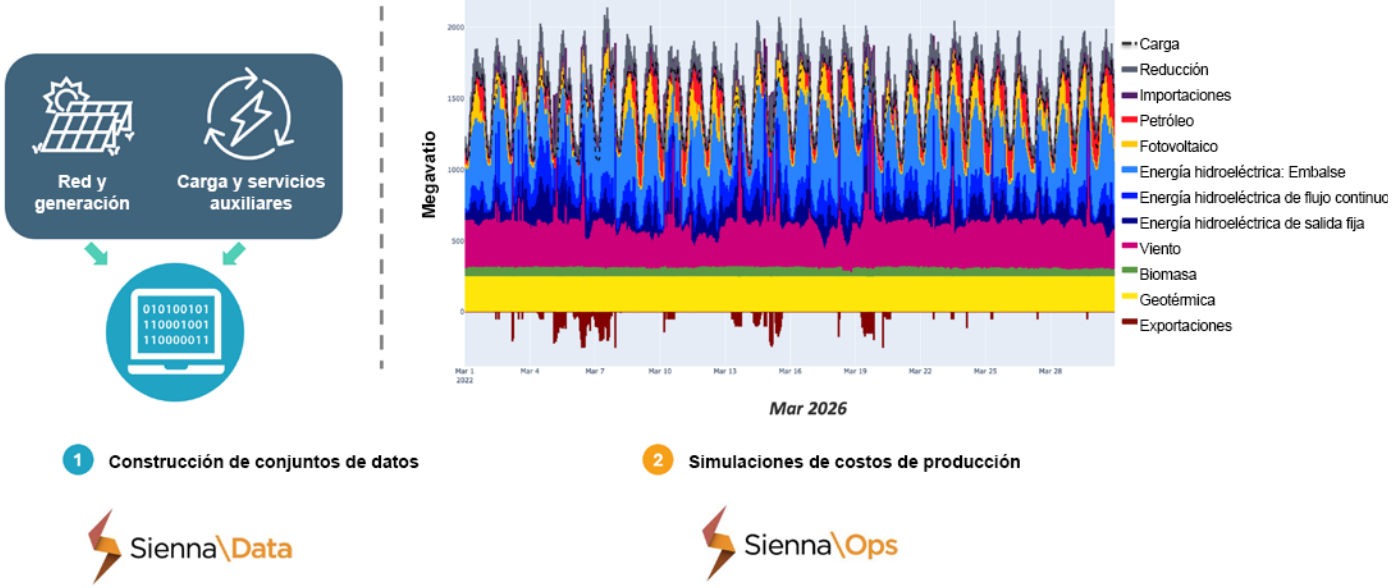

Figura 7. Ejemplo de flujo de proceso de Sienna *Imagen de Omar Guerra y Andrew Bilich, NREL*

la integración de energías renovables y mejorar las operaciones de la red. Utilizando Sienna, NREL trabajó con la División de Operaciones y la División de Planificación de ICE para respaldar un mejor modelado de sistemas para la integración de energía renovable y almacenamiento en línea con su plan de expansión de capacidad para 2023[15] que destacó la necesidad de ampliar significativamente la capacidad de energía renovable (460 MW de energía eólica y solar entre 2024-2027; 525 MW adicionales entre 2028 y 2032, y 650 MW entre 2033 y 2035), así como almacenamiento de energía (al menos 30 MW de almacenamiento de energía para 2028 y más de 120 MW para 2033) para apoyar la integración.

Una comparación inicial, por ejemplo, utilizó un punto de referencia de 2022 para los patrones de generación y la expansión de la red conforme al plan de expansión de capacidad para 2026, con el fin de evaluar la ubicación óptima de 200 MW de almacenamiento de 2 horas dentro de la red costarricense para reducir la cantidad total de combustibles fósiles quemados durante marzo (el mes de mayor carga). Se desarrollaron cuatro escenarios para 2026: (1) Sin almacenamiento; (2) 200 MW desplegados cerca de la generación en el Norte; (3) 200 MW desplegados en la parte central del país cerca de la carga; y (4) 100 MW cada uno en las áreas Norte y Central de la red.

Este modelado inicial destacó que el despliegue de almacenamiento podría reducir el consumo de petróleo en el mes de mayor carga en un 15%–20% (equivalente a un ahorro de 2.96–3.89 millones de litros de combustible[16]), siendo los mayores ahorros alcanzados cuando el almacenamiento se desplegó en la región Central cerca de la carga (**Figura 7**).

Con el entrenamiento en el modelo Sienna, el ICE ahora puede construir y evaluar escenarios adicionales para el despliegue de almacenamiento, comparando métricas como costos de energía, consumo de combustible, vertimiento e integración de renovables, entre otros.

Este proceso ayudó a reunir a los interesados de diferentes unidades de planificación de generación, planificación de transmisión y planificación de operaciones, que históricamente han operado de manera separada. Sin embargo, el uso de un enfoque de modelado consistente y el aprovechamiento de las herramientas de código abierto de Sienna para derribar las barreras relacionadas con el software en las diferentes agencias gubernamentales permitió que diferentes partes interesadas estuvieran físicamente en sintonía, utilizando el mismo modelo y conjunto de datos para comprender mejor los escenarios futuros y sus consecuencias. interacciones dinámicas. Este elemento de convocatoria y alineación fue en muchos sentidos tan impactante como el propio modelo del escenario.

Desarrollo de capacidades para el modelado de minirredes nacionales

Para apoyar la planificación de minirredes de Honduras en el marco del Plan Nacional de Electrificación Rural, el NREL llevó a cabo una serie de talleres técnicos de desarrollo de capacidades con el Secretario de Energía y otras partes interesadas del sector energético de Honduras centrados en el uso de la herramienta REopt de código abierto del NREL[17] para diseñar y realizar evaluaciones tecnoeconómicas de posibles sistemas de minirredes solares distribuidas + almacenamiento. En total, más de 30 funcionarios de la Secretaría de Energía, la Comisión Reguladora de Electricidad, la Universidad Nacional de Honduras y otras organizaciones recibieron capacitación sobre la interfaz en línea de REopt[18] y el conjunto de códigos back-end de Julia.[19]

[15] Ver https://www.grupoice.com/wps/wcm/connect/741c8397-09f0-4109-a444-bed598cb7440/PEG+2022-2040+versi%C3%B3n+final.pdf?MOD=AJPERES&CVID=oLtHPgv.
[16] El impacto macroeconómico real de estos ahorros dependerá de una variedad de factores como subsidios, tarifas a los clientes, etc. que el ICE y otras partes interesadas evaluarán en otros modelos de escenarios en el futuro.
[17] Ver https://reopt.nrel.gov/tool.
[18] Ver https://reopt.nrel.gov/tool.
[19] Ver https://github.com/NREL/REopt_API.

Adopción y adaptación de normas

Las normas proporcionan requisitos básicos para el rendimiento, el funcionamiento, las pruebas, la seguridad y el mantenimiento de los recursos energéticos distribuidos (DER). La implementación adecuada de normas puede agilizar la interconexión; reducir las ineficiencias en la fabricación, pruebas, certificación e instalación; y contribuir a la estabilidad, confiabilidad y resiliencia del sistema de energía a granel.

Interoperabilidad y ciberseguridad

La ubicuidad de inversores avanzados capaces de comunicación bidireccional, junto con un número creciente de partes interesadas involucradas, presenta nuevas e interesantes oportunidades para soluciones de red modernas, así como desafíos críticos en torno a la interoperabilidad de DER y la ciberseguridad entre organizaciones.

Previsión, planificación y gestión de DER

Los marcos de planificación heredados a nivel de sistemas masivos y de distribución pueden requerir nuevos procesos, conjuntos de herramientas y flujos de datos para integrar de manera confiable grandes cantidades de DER. La previsión de DER, la desagregación del perfil de carga neta, el modelado de adopción de clientes, la coordinación de T&D y el análisis avanzado del flujo de carga pueden ayudar a mejorar la confiabilidad del sistema a largo plazo y obtener flujos de valor completos de los DER.

Pruebas y certificación de equipos

Las pruebas y la certificación de DER son fundamentales para garantizar que los equipos DER disponibles localmente sean capaces de cumplir con los requisitos de rendimiento y seguridad. La capacidad de acreditar equipos según normas, ya sea a través de laboratorios de pruebas acreditados a nivel nacional o procesos de acreditación internacional, puede acelerar la interconexión y proporcionar confianza adicional para el funcionamiento seguro y confiable de los DER.

Procedimientos de interconexión

Las aplicaciones formalizadas de interconexión de DER y los procedimientos pueden proporcionar claridad a los clientes y desarrolladores, consistencia en los estudios de impacto en el sistema de servicios públicos, permitir un seguimiento preciso de las interconexiones de DER y hacer cumplir criterios críticos del sistema para la interconexión de DER.

Figura 8. Descripción general de las vías de integración de DER. **Nota:** T&D = transmisión y distribución
Imagen de Killian McKenna, Erik Pohl y Andrew Bilich, NREL

Marcos regulatorios para almacenamiento de energía

Dado el fuerte interés en el apoyo regulatorio identificado a través de la serie de talleres, NREL organizó un taller regulatorio adicional que ayudó a los participantes a evaluar el marco regulatorio de sus países, profundizando en seis áreas de la evaluación de preparación para el almacenamiento de energía.[20] El taller contó con la participación de 33 funcionarios de Honduras, República Dominicana, Haití, Ecuador, El Salvador, Perú, Chile y Uruguay.

RELAC trabajó con los países para determinar el apoyo de asistencia técnica para el desarrollo/refinamiento de marcos regulatorios para el almacenamiento de energía basados en los planes de acción de almacenamiento de energía. RELAC logró catalizar el apoyo del Centro de Soluciones de Energía Limpia del Ministerio de Energía Limpia (6 países) y de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) para implementar la asistencia técnica.

Un ejemplo de amplio apoyo regulatorio incluye asistencia técnica para perfeccionar los códigos de red nacionales en El Salvador, Perú y Ecuador, así como códigos de red subnacionales en Galápagos para apoyar la integración y operación del almacenamiento de energía y otros recursos energéticos distribuidos (DER). Este trabajo se centró en comparar los marcos regulatorios existentes[21, 22, 23] y crear capacidad para que los ministerios de energía adapten y mejoren sus normas en consonancia con las normas de mejores prácticas, como el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) 2800-2022 e IEEE 1547-2018 (**Figura 8, Figura 9**).[24, 25, 26]

Estas comparaciones ayudan a ilustrar aspectos técnicos clave de sus códigos de red que podrían aclararse para respaldar mejor la integración de los recursos energéticos distribuidos, en particular el almacenamiento de energía. Los tres países tenían diferentes puntos de partida para los códigos de red, pero en general un área clave en la que centrarse en los tres códigos de red fue mejorar las disposiciones para las funciones de soporte y control de voltaje. Es importante tener en cuenta que la **Figura 9** en particular representa una comparación preliminar de alto nivel de las normas IEEE y los códigos de red traducidos específicos de

[20] Ver https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/78197.pdf.
[21] Documentos del código de red de El Salvador: Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones de El Salvador ACUERDO n.° 294-E-2011; ACUERDO n.° 30-E-2011.
[22] Documentos del código de red del Perú: Propuesta del COES para el Código de Diseño de Red, agosto de 2020; Reglamentos de Operación del Sistema de Transacciones de la Unidad de Transacciones basados en el Costo de Producción, D.O. Número 138, Volumen 392.
[23] Gobierno de Ecuador, Junta Directiva de la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables RESOLUCIÓN N.° ARCERNNR-XX/2023; Proyecto de Regulación CodCx; Código de Operación.
[24] Patel, Manish. 2022. "Norma IEEE Std. 2800™-2022 para la Interconexión e Interoperabilidad de Recursos Basados en Inversores (IBR) Interconectados con Sistemas de Transmisión de Energía Eléctrica Asociados. Seminario web conjunto EPRI-NAGF-NATF-NERC". 3 de mayo de 2022. https://www.nerc.com/comm/RSTC/IRPS/IEEE_2800-2022_EPRI-NAGF-NATF-NERC_May_3-2022_Joint_Webinar.pdf.
[25] IEEE. 2022. "2800-2022: Norma IEEE para la Interconexión e Interoperabilidad de Recursos Basados en Inversores (IBR) Interconectados con Sistemas de Transmisión de Energía Eléctrica Asociados". Norma IEEE Std 2800-2022. Febrero de 2022. doi: 10.1109/IEEESTD.2022.9762253.
[26] IEEE. 2018. "1547-2018: Norma IEEE para la Interconexión e Interoperabilidad de Recursos de Energía Distribuida con Interfaces de Sistemas Eléctricos Asociados". Norma IEEE 1547-2018. Abril de 2018. https://ieeexplore.ieee.org/document/8332112.

Funcionalidad de cuadrícula clave	IEEE 2800-2022	IEEE 1547-2018	Perú	El Salvador	Ecuador
Punto de referencia de aplicabilidad	POM	POC/PCC	PCC	O	O
Ajustabilidad en rangos de configuración	✓	✓	-	-	-
Priorización de funciones	✓	✓	-	-	-
Control de velocidad de rampa	-	✓	✓	-	✓
Interface de comunicación	✓	✓	✓	✓	✓
Desactivación del servicio de permisos	✓	✓	-	O	-
Limite de potencia activa	✓	✓	✓	✓	✓
Monitoreo de datos clave	✓	✓	✓	✓	✓
Configurabilidad remota	✓	✓	✓	O	✓
Configuración de potencia activa	✓	✓	-	✓	-
Programación de valores de energía	✓	-	O	✓	-
Factor de potencia constante	✓	✓	✓	✓	✓
Voltios-VAR	✓	✓	O	-	✓
Voltaje ajustable de forma autónoma	-	✓	-	-	-
VAR de noche	✓	-	-	-	O
Potencia reactiva constante	✓	✓	✓	✓	O
Voltios-vatios	✓	✓	O	-	O
Soporte de voltaje dinámico equilibrado	✓	O	✓	-	✓
Soporte de voltaje dinámico desequilibrado	✓	O	-	-	✓
Mantenimiento de la frecuencia	✓	✓	✓	-	✓
Mantenimiento durante el cambio rápido de frecuencia	✓	✓	-	-	✓
Mantenimiento durante caída de tensión	✓	✓	✓	-	✓

	IEEE 2800-2022	IEEE 1547-2018	Perú	El Salvador	Ecuador
Mantenimiento durante sobretensión transitoria	✓	✓	-	-	-
Mantenimiento durante caídas consecutivas de tensión	✓	✓	-	-	-
Restauración de la salida después del mantenimiento durante caída de tensión	✓	✓	O	-	O
Mantenimiento durante salto de ángulo de fase de tensión	✓	✓	-	-	✓
Caída de frecuencia/vatios de frecuencia	✓	✓	✓	✓	✓
FFR de baja frecuencia	✓	-	O	-	O
FFR de sobrefrecuencia	✓	-	O	-	O
Retorno al servicio	✓	✓	-	-	✓
Arranque en negro	✓	O	-	✓	✓
Interrupción por frecuencia anormal	✓	✓	O	O	✓
Protección contra ROCOF	✓	-	-	-	✓
Interrupción por voltaje anormal	✓	✓	O	✓	✓
Protección contra sobrecorriente de CA	✓	O	✓	O	✓
Detección y desconexión de isla no intencional	✓	✓	-	-	O
Protección del sistema de interconexión	✓	O	✓	O	✓
Limitación de la inyección de corriente CC	-	✓	-	-	-
Limitación de fluctuaciones de voltaje	✓	✓	✓	✓	✓
Limitación de la distorsión actual	✓	✓	✓	✓	✓
Distorsión de voltaje de limitación	✓	✓	✓	✓	✓
Limitación de sobretensión transitoria	✓	✓	✓	-	-

✓ = La descripción de la funcionalidad existe parcial o completamente en la norma
O = Requisitos de funcionalidad poco claros
- = No hay una descripción clara de la funcionalidad en el estándar
NOTA: Esta tabla representa una revisión preliminar de alto nivel de estos estándares y los códigos de red traducidos específicos de cada país. Como tal, es posible que esta tabla no incluya todas las funcionalidades enumeradas en cada documento. Los documentos revisados incluyeron requisitos para interconexiones de transmisión, interconexiones de distribución o ambas.

Figura 9. Comparación de funciones de soporte de red para almacenamiento de energía en Perú, El Salvador y Ecuador con las normas IEEE
Imagen de Killian McKenna, Erik Pohl y Andrew Bilich, NREL

cada país en momentos específicos (consulte los documentos revisados en notas a pie de página). Como tal, es posible que la información no sea exhaustiva sobre las funcionalidades enumeradas en cada documento. Además, las evaluaciones proporcionadas en esta figura no proporcionan una indicación de la solidez o eficacia de los códigos de red del país en sí, sino más bien una indicación de si las diferentes funcionalidades destacadas en las normas IEEE estaban presentes con requisitos claros en los códigos de red del país.

Algunos aspectos destacados de los flujos de trabajo regulatorios adicionales incluyen:

- Acompañamiento de Honduras en un proceso de solicitud de propuestas para revisar y desarrollar un marco de almacenamiento de energía para la Comisión Reguladora de Energía Eléctrica
- Apoyo técnico asesor para el Ministerio de Energía y Minas y la Superintendencia de Electricidad en la República Dominicana en un proceso de solicitud de propuestas para elaborar requisitos técnicos y mecanismos de compensación para sistemas de almacenamiento de energía mediante baterías (BESS)
- Revisión técnica de propuestas de habilitaciones regulatorias para el almacenamiento de energía en redes de generación, transmisión y distribución en Panamá
- Asesoría técnica para cuestiones regulatorias relacionadas con tarifas de alimentación, integración de energías renovables y almacenamiento de energía en Guatemala.
- Asesoramiento técnico para el regulador de Barbados, el Ministerio de Energía y las empresas de servicios públicos en procesos de adquisición competitiva para almacenamiento de energía
- Capacitación técnica en cuatro partes[27] para la planificación y evaluación de energía resiliente para la Autorité nationale de régulation du secteur énergétique, el Ministère des Travaux Publics, Transports et Communications, la Unidad de Ejecución Técnica del Ministerio de Economía y Finanzas, y Electricité d'Haïti en Haití.

Además, alineado con este programa centrado en el almacenamiento de energía, el BID, con el apoyo técnico de la Asociación Iberoamericana de Reguladores de Energía, publicó el ***Marco Regulatorio para la Incorporación de Almacenamiento de Energía en Sistemas Eléctricos: Experiencias Internacionales en Modelos Regulatorios***[28], un informe que presenta una síntesis de las experiencias internacionales con la regulación de sistemas de almacenamiento de energía mediante baterías (BESS) en mercados con alta penetración de almacenamiento, identificando elementos regulatorios clave que podrían favorecer la rápida adopción de sistemas de almacenamiento de energía en países de América Latina y el Caribe (LAC).

[27] Ver https://www.youtube.com/playlist?list=PLmIn8Hncs7bFypKnZplxLROne0-qj-RdD.
[28] Ver https://publications.iadb.org/es/incorporacion-de-almacenamiento-de-energia-en-los-sistemas-electricos-experiencias-internacionales.

Movilización de apoyo adicional

RELAC utilizó los talleres, la asistencia técnica y la elaboración de los planes de acción nacionales de almacenamiento de energía como base para catalizar financiamiento adicional y apoyo de asistencia técnica para los países de RELAC.

Por ejemplo, como se destacó anteriormente, RELAC ayudó a aprovechar el apoyo existente para abrir y desarrollar nuevas oportunidades de fondos y programas, incluido el apoyo de asistencia técnica para marcos regulatorios para el almacenamiento de energía a través del Centro de Soluciones de Energía Limpia de la Ministerial de Energía Limpia.[29] RELAC también permitió apoyo técnico adicional para la capacitación en energía resiliente de Haití a través de un proyecto con la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), así como para la planificación de electrificación en Honduras mediante un programa con la Embajada de los Estados Unidos.

A gran escala, GEAPP ha trabajado para lanzar el Consorcio BESS, una colaboración entre inversores, socios de la Alianza y países para catalizar la implementación de sistemas de almacenamiento de energía en baterías (BESS) en un conjunto de países y servicios públicos pioneros en países de ingresos bajos y medianos. RELAC trabajó directamente con GEAPP para ampliar la asistencia técnica a cuatro países de RELAC[30]: República Dominicana, Honduras, Barbados y Uruguay, que se centrarán en acelerar la implementación de pilotos y proyectos concretos de almacenamiento de energía que puedan servir como ejemplos y éxitos replicables en la región.

La asistencia técnica continua dentro de RELAC se centra en refinar los planes de acción específicos de cada país para alinearse con los objetivos del Consorcio GEAPP/BESS, identificar y evaluar técnicamente proyectos piloto o de gran escala potenciales para el almacenamiento de energía, apoyar la ampliación del modelado y análisis de las necesidades del sistema para el almacenamiento de energía, y fortalecer la capacidad técnica de los actores clave del país. En última instancia, este apoyo ayudará a los países objetivo a definir y desarrollar proyectos específicos y colaboraciones con los socios del Consorcio GEAPP/BESS.

Conclusiones y próximos pasos

El BID y NREL siguen comprometidos a ayudar a los países de RELAC a integrar soluciones de almacenamiento de energía, tanto en la red eléctrica como fuera de ella. El apoyo futuro incluirá como mínimo: (1) desarrollar marcos regulatorios para agilizar la adopción; (2) realizar estudios de viabilidad para integrar el almacenamiento de energía en la red eléctrica; (3) proporcionar o movilizar financiamiento para proyectos, ya sea a escala de red o fuera de la red. Además del apoyo de NREL en los planes de acción nacionales, el BID también está respaldando estudios para: (1) incorporar el almacenamiento en la planificación de largo plazo del sistema eléctrico del Ecuador; (2) identificar y priorizar proyectos de almacenamiento de energía en Colombia; y (3) evaluar la viabilidad de incluir almacenamiento de energía en el sistema teleférico de La Paz.

Tanto NREL como el BID continuarán brindando apoyo a los países de RELAC no solo en almacenamiento de energía, sino también en otras áreas clave, desafíos y condiciones habilitadoras relacionadas con el logro de los ambiciosos objetivos de energía renovable de la iniciativa RELAC. Por ejemplo, la serie técnica de seguimiento de RELAC se enfoca en operadores de sistemas, tecnologías para mejorar la red e integración de energías renovables.

Contacto: Daniella Rough (Gerente de Proyecto, NREL), daniella.rough@nrel. gobierno; Juan Paredes (Especialista Senior en Energías Renovables, IDB), jparedes@ iadb.org

Autores enumerados: Andrew Bilich, Daniella Rough, Omar José Guerra Fernández, José Daniel Lara, Holly Darrow

Agradecimientos: La serie de talleres sobre almacenamiento de energía y la asistencia técnica de RELAC contaron con el apoyo de una variedad de profesionales e investigadores del NREL, el BID y organizaciones asociadas, entre ellos Caroline Uriarte (NREL), Ron Benioff (NREL), Nate Blair (NREL), Angela Ortega Pastor (NREL), Barbara O'Neill (NREL), Lina Ramirez (NREL), Amy Rose (NREL), Byron Pullutasig (NREL), Killian McKenna (NREL), Erik Pohl (NREL), Karin Wadsack (NREL), Wesley Cole (NREL), Taylor Curtis (NREL), Amanda Farthing (NREL), Rodrigo Henríquez-Auba (NREL), Natasha Musalem (NREL), Sofia García-George (NREL), Anastasiia Sakharova (NREL), Jennie Jorgensen (NREL), Paul Denholm (NREL), Ahmad Pesaran (NREL), Marcus Bianchi (NREL), Juan Cárdenas (BID), Gabriela Gutiérrez (BID), Edwin Malagón (BID) y Bob Kott (CAISO).

Nota de financiación: El trabajo de asistencia técnica de NREL en almacenamiento de energía ha sido posible gracias al financiamiento del Departamento de Estado de los Estados Unidos, del Clean Energy Solution Center, y del financiamiento futuro del Consorcio GEAPP/BESS. El trabajo de asistencia técnica del BID en almacenamiento de energía ha sido posible gracias al apoyo financiero del Fondo de Inversiones Climáticas a través del programa de cooperación técnica regional "Fomento de los Mercados de Almacenamiento de Energía en LAC para el Acoplamiento Multisectorial Resiliente de Bajo Carbono" (ATN/TC-18774-RG – RG-T3801).

[29] Ver https://www.cleanenergyministerial.org/initiatives-campaigns/clean-energy-solutions-center/.
[30] Los países objetivo fueron establecidos por GEAPP y la iniciativa BESS por separado del trabajo de RELAC.

Laboratorio Nacional de Energías Renovables
15013 Denver West Parkway, Golden, CO 80401
303-275-3000 • www.nrel.gov

NREL imprime en papel reciclado.

NREL es un laboratorio nacional del Departamento de Energía de los Estados Unidos, Oficina de Eficiencia Energética y Energía Renovable, operado por Alliance for Sustainable Energy, LLC.

NREL/TP-7A40-89643 • Junio de 2024

Este trabajo fue escrito, en parte, por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL), operado por Alliance for Sustainable Energy, LLC, para el Departamento de Energía (DOE) de los Estados Unidos de conformidad con el Contrato n.° DE-AC3608GO28308. Financiamiento proporcionado por el Departamento de Estado de Estados Unidos. Las opiniones expresadas en este informe no representan necesariamente las opiniones del DOE o del Gobierno de los Estados Unidos, o cualquier agencia del mismo, incluido el Departamento de Estado.