

Implicaciones de la Integración de Energías Renovables Intermitentes a la Red Eléctrica

Ian Sosa Tinoco*, Clarissa Acosta Campas; Gustavo Nieves Monarrez; Melissa Navarro Robles;

Mario Suzuki Valenzuela.

Instituto Tecnológico de Sonora, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica,

Antonio Caso S/N Col. Villa ITSON, Ciudad Obregón, Sonora, Mexico

*ian.sosa@itson.edu.mx

Resumen

Este trabajo aborda las implicaciones de integrar energías renovables intermitentes (ERI), como la solar y eólica en las redes eléctricas. Estas energías ofrecen beneficios significativos, incluyendo la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la diversificación de la matriz energética y el impulso a la innovación tecnológica. Sin embargo, presentan desafíos como la intermitencia y variabilidad en la generación, la necesidad de ampliar la infraestructura eléctrica y los impactos en la estabilidad de la red. Para enfrentar estos desafíos, se proponen varias estrategias. La gestión de la producción y la demanda por medio de pronósticos es crucial para equilibrar la oferta y la demanda de energía, reduciendo la necesidad de costosos sistemas de almacenamiento. El desarrollo de tecnologías de almacenamiento avanzadas, como baterías de ion-litio y almacenamiento hidroeléctrico, es esencial para mitigar la intermitencia de las ERI y mejorar la estabilidad de la red. Además, las consideraciones políticas y económicas juegan un papel fundamental en la integración de las ERI, así mismo se destacan diversos incentivos fiscales y financieros implementados en América Latina y el Caribe para fomentar la inversión en energías renovables y tecnologías de almacenamiento. Se observa que la adaptación de los marcos regulatorios es primordial para promover la participación equitativa de las ERI y garantizar la seguridad del suministro eléctrico.

Palabras clave: Energías renovables intermitentes; red eléctrica inteligente; gestión de la demanda; gestión de la producción; pronósticos energéticos

Abstract

This article discusses the implications of integrating intermittent renewable energies (IREs), such as solar and wind, into electricity grids. These energies offer significant benefits, including the reduction of greenhouse gas emissions, the diversification of the energy matrix and the promotion of technological innovation. However, they present challenges such as intermittence and variability in generation, the need to expand electrical infrastructure and impacts on grid stability. To address these challenges, several strategies are proposed. Production and demand management through forecasting is crucial to balance energy supply and demand, reducing the need for costly storage systems. The development of advanced storage technologies, such as lithium-ion batteries and hydroelectric storage, is essential to mitigate ERI intermittency and improve grid stability. In addition, political and economic considerations play a key role in the integration of ERIs, as well as various fiscal and financial incentives implemented in Latin America and the Caribbean to encourage investment in renewable energy and storage technologies. It is noted that the adaptation of regulatory frameworks is essential to promote the equitable participation of ERIs and ensure the security of electricity supply.

Key words: intermittent renewable energies; smart grid; demand management; production management; energy forecasting; energy management.

Beneficios de las Energías Renovables Intermitentes (ERI)

Reducción de emisiones.

Las ERI, al no depender de combustibles fósiles, ayudan a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo así a mitigar el cambio climático. Durante años, la utilización de fuentes de energía fósil, se ha relacionado como el mayor productor de emisiones de gases de efecto invernadero, alcanzando en 2019 los 38 GtCO₂e²⁰ (rango de ± 1.9) (Montoya Martín del Campo, 2022), y es por ello que diversos organismos internacionales mencionados en Li *et al.* (2022), han manifestado que una de las propuestas globales para frenar el incremento de las emisiones, es la producción energética por medio de energías renovables, tratando de frenar los efectos adversos.

La creciente incorporación de estas centrales a la red eléctrica de cada país va aunado a la eficiencia y seguridad energética, el desarrollo tecnológico y cuidado del medio ambiente, como es el caso de los acuerdos de París establecidos por cada país, para colaborar con la prevención del cambio climático. Otra ventaja es la diversificación de la matriz energética, al aprovechar cada país diferentes formas de producir energía, disminuyendo la dependencia energética (Li *et al.*, 2022).

Con base en la información de Montoya Martín del Campo (2022), el porcentaje mundial generado de dióxido de carbono de 1850 a 2021 corresponde al 20.5% en Estados Unidos, 20% en China y 1.2% en México. Sin embargo, México ha aumentado su participación de energías renovables en su matriz energética, no obstante, el tamaño de dicha matriz es menor que la de Estados Unidos y China. Además, este contraste demuestra que si bien, es importante la participación en la disminución de los gases de efecto invernadero, cada país los realiza bajo su propia soberanía energética, debido a que los compromisos internacionales adoptados implican cambios en diversos ámbitos (generación, transporte y distribución).

Diversificación energética.

La diversificación energética puede manifestarse de diferentes formas: como una forma de aplicar un enfoque sistemático a la gestión de

la transición energética, como un complejo conjunto de cambios organizativos y técnicos en el sector de la energía eléctrica, y como un mecanismo institucional de apoyo a las innovaciones (Gitelman *et al.*, 2023). La diversificación energética es importante para asegurar la seguridad energética de todos los países, en especial los países en vías de desarrollo (Seriño, 2022). Otro aspecto importante para asegurar la diversificación energética es incluir el aspecto de sostenibilidad en las directrices y normativas de los países que intentan llegar a esa diversificación energética (Farah, 2021).

Innovación tecnológica

El desarrollo tecnológico es inevitable para sobrellevar la variación en la producción de energía y consecuencias que ocasionan, una de las acciones consideradas actualmente es el almacenamiento, para evitar congestionar la red en horas de gran suministro y evitar el desabasto en horas de menor producción, otras tecnologías son la generación distribuida, las redes inteligentes y equipos que cuenten con sus propios sistemas de generación. Por otra parte, la variabilidad en generación impacta en la calidad de la energía producida, es por ello que además del desarrollo tecnológico, también es importante contar con modelos de pronósticos para planificar eficazmente la generación en diferentes periodos de tiempo, para aprovechar los recursos de manera adecuada (Mlilo *et al.*, 2021). La integración exitosa de las energías renovables variables depende de la pronta solución a las consecuencias de su intermitencia, ya sea por desarrollo tecnológico, métodos de análisis o planes de acción ante diversos escenarios.

Desafíos de la integración de ERI

La diversificación de la matriz energética cuenta con un enfoque clave en la planificación energética, contar con múltiples fuentes energéticas con el fin de satisfacer el consumo energético de la población es de vital importancia para el mundo moderno donde las emisiones de contaminantes por combustibles fósiles han crecido descomunalmente, por ello, el uso de energías alternativas se adapta a nuestros fines, sin embargo, estas no son perfectas y algunas presentan problemas como intermitencia y variabilidad, destacando la energía solar y eólica.

Intermitencia y variabilidad del suministro eléctrico.

La generación de energía solar y eólica está sujeta a las condiciones climáticas y temporales, lo que puede provocar fluctuaciones en la oferta de energía. Algunos factores como las condiciones climáticas, topográficas, temporales, entre otras, pueden generar problemas en la generación eléctrica. Esto se puede traducir en problemas como la intermitencia y variabilidad (Khalid, 2024), las cuales al presentarse en la red eléctrica pueden ocasionar la variación de la regulación de tensión, variación de la frecuencia y falta de capacidad para suministrar la demanda energética.

La intermitencia puede verse en sistemas de generación solar por la dependencia de estos a las horas de aprovechamiento de luz solar de un lugar y tiempo determinados; la producción oscila a lo largo del día y algunos efectos atmosféricos son responsables de dichas oscilaciones, como nubes, polvo, niebla, nieve, entre otros (Engeland *et al.*, 2017). Por otro lado, los sistemas de generación eólicos requieren un flujo constante de viento para su funcionamiento, sin embargo, la variabilidad puede ocasionar problemas de despacho potencia, lo que conlleva a cortes de energía y reducción en la confiabilidad del suministro de potencia (Yuan *et al.*, 2020).

Necesidades de ampliación en la infraestructura eléctrica

Es cierto que la transición hacia las energías renovables plantea desafíos importantes para la infraestructura eléctrica, principalmente si tratamos con energías intermitentes. De acuerdo con Jenss (2021), estas requieren una red eléctrica que garantice el suministro constante y confiable de energía, al igual que equipos de almacenamiento de alta eficiencia. Esto puede requerir altas inversiones en tecnologías de almacenamiento como baterías, sistemas de almacenamiento hidroeléctrico y modernización de la red que conlleve una buena gestión de la carga, desarrollo de infraestructura inteligente. Cabe destacar que la modernización de la red ofrece múltiples beneficios como eficiencia operativa y funciones de gestión más avanzadas donde incluso el consumidor es parte del proceso mediante tecnologías como contadores

inteligentes y sistemas de comunicación avanzados. (Oliveiro *et al.*, 2023).

De acuerdo con Castineyra *et al.* (2023), el impacto que tienen las energías renovables en América Latina de acuerdo con el mercado de energía muestra valores de 37% para energía hidráulica, 14% energía eólica, 10% energía solar y 28% de gas natural, lo cual ha tenido un gran impacto en la infraestructura eléctrica de varios países. Esto ha desembocado en grandes inversiones a este sector para modernizar las redes eléctricas.

Según el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN), en 2023 (Secretaría de Energía, 2023) México ha tenido un incremento significativo en la generación limpia e integración de energías renovables, donde se contabilizaba al 2022 que la generación de energía eléctrica total por energías limpias (aquella que se encuentra “libre de combustible”) ascendía al 31.2%. Sin embargo, al cuestionar este término de energías limpias y bajo el estándar de energías de origen renovable, los cálculos establecidos se reducen a un 28.7% de la generación total.

Cabe destacar que, en los últimos años, el PRODESEN no ha calculado la proporción de energía limpia que se generara para años a futuro en su totalidad, como en la última edición donde no se tiene un valor claro para fechas como 2024, donde se esperaba un aumento al 35% de la generación eléctrica según la Ley de Transición Energética, la Ley General de Cambio Climático y el Acuerdo de París.

Igualmente, se mantiene una tendencia de crecimiento en el consumo de electricidad, la cual podrá potencialmente rebasar proyecciones, donde se tenía que en los próximos 15 años (2023 – 2037) el consumo neto de energía eléctrica se incrementará en una tasa promedio anual del 2.5%. Esto obliga a los proveedores de energía eléctrica aumentar las capacidades instaladas en centrales de generación, que al igual en PRODESEN tiene una estimación de crecimiento del 67% entre 2022 y 2037 y, en cuanto a generación distribuida, esta tendrá un crecimiento de hasta el 338% según estimaciones de 2022 al 2037, lo que implica el cambio en la red eléctrica de distribución con el fin de que el usuario se vuelva parte como productor y consumidor, según los contratos de consumo que marca la Comisión Federal de Electricidad.

Impacto en la estabilidad de la red

Como se mencionó anteriormente, el uso de energías renovables, en conjunto con sus problemas que conlleva la intermitencia y variabilidad de estos, sugieren un impacto en la estabilidad de la red, la cual puede volverse inestable debido al suministro de energía errático, lo que podría resultar en daños al equipo, interrupciones y cortes de energía.

Existen problemas documentados en la literatura que se presentan para la estabilidad del voltaje y frecuencia de la red, ante la integración de fuentes de energías renovables. A continuación, se describen tres casos:

1. Variaciones de voltaje y frecuencia. La naturaleza de las fuentes intermitentes como solar y eólica afecta los valores de frecuencia y voltaje lo que genera problemas de confiabilidad del suministro. Como ejemplo, se tiene que en el trabajo de Mokeke y Thamae (2021), se realizó una simulación de la red nacional de Lesotho, África, considerando múltiples sistemas de generación energética por solar fotovoltaica y eólica y una falla eléctrica con el fin de observar la adaptación de la red ante variaciones de voltaje, frecuencia y tiempos de respuestas teniendo penetración de sistemas de generación por fuentes renovables, donde la intermitencia en estos sistemas en conjunto con la falla generan respuestas tardías por parte del sistemas de protección y los reguladores de voltaje y frecuencia. Los inversores y bancos de baterías pueden ser empleados para aportar inercia y soporte de voltaje al sistema de potencia (Mokeke y Thamae, 2021).
2. Sobrecarga de líneas eléctricas y subestaciones. Tradicionalmente los sistemas de distribución se han diseñado para operar de manera radial, sin embargo, la integración de las ERI, en combinación con un escenario de demanda mínima y generación máxima pueden ocasionar la congestión de líneas y transformadores. Algunos de los problemas que se pueden presentar son: mala operación de los sistemas de protección, colapso de la red eléctrica, etc. (Cosgrove *et al.*, 2023).
3. Desajuste entre la demanda y oferta de energía. La producción de energía renovable puede ser muy alta en algunos momentos, pero también

puede ser baja en otras condiciones. Para los generadores, el no poder suministrar toda la capacidad se refleja en pérdidas económicas. (Song *et al.*, 2023). Debido a ello y en términos de confiabilidad y resiliencia, los gestores de redes eléctricas pueden presentar ciertos grados de incertidumbre en cuanto el suministro eléctrico que pueden proveer según la necesidad de los usuarios. Como se menciona en el trabajo de Song *et al.* (2023), la energía renovable es inherentemente intermitente y en sistemas eléctricos que buscan el desarrollo a redes de emisiones cero es importante la introducción de fuentes renovables. En su caso, en Reino Unido, diversos escenarios de redes de cero emisiones se han generado y en su mayoría requieren sistemas de almacenamiento de alta eficiencia con el fin de solventar la demanda y oferta de energía eléctrica sin importar las condiciones de terreno, meteorológicas y/o crecimiento poblacional. Sin embargo, la implicación de mejorar la red eléctrica con sistemas de almacenamiento podría causar potencialmente el aumento en costos de energía eléctrica.

Soluciones y Estrategias

Gestión de la producción (Curtailment)

Las altas penetraciones de capacidad ERI, como la eólica y la solar, pueden llevar a la restricción del generador de ERI debido a la capacidad limitada de la red eléctrica para recibir esta energía. De acuerdo con Niet *et al.* (2018), el curtailment conlleva un aumento de los costes, que corren a cargo del operador del sistema eléctrico si el contrato con el generador de ERI es obligatorio, o del propietario del generador. Estos costes, que denominamos costes de restricción, incluyen: requisitos contractuales de pago directo al operador del generador; pérdida de créditos de energía renovable; y aumento del coste del ciclo de vida de la ERI porque los costes fijos y de capital se amortizan a lo largo de una menor cantidad de generación.

Diversos factores, como la combinación de generación, la estructura del mercado, las normas de funcionamiento y la red de transporte, afectan al funcionamiento de los generadores de energías renovables y, por tanto, a la posibilidad de que se produzcan restricciones. Por ello, puede ser útil

para las regiones que esperan un crecimiento de la generación de energías renovables conocer la experiencia en diversas jurisdicciones (Bird *et al.*, 2016).

Existen algunas soluciones en la literatura que permiten reducir el curtailment en algunos escenarios, como el trabajo de Chen y Wei (2023), que por medio de un algoritmo avanzado de despacho encontraron el escenario de despacho óptimo para los casos estudiados. Otro ejemplo es el de Wang *et al.* (2021), que trabajaron con un sistema eléctrico-térmico de distribución para generar un algoritmo de optimización de la gestión.

Gestión de la demanda.

La gestión de la demanda es crucial para la integración de las energías renovables intermitentes, como la solar y la eólica, debido a varios factores clave. Primero, ayuda a equilibrar la oferta fluctuante con la demanda constante o variable de energía, evitando desequilibrios en la red eléctrica. Dado que las energías renovables intermitentes no siempre producen energía de manera constante, la gestión de la demanda permite ajustar el consumo en función de la disponibilidad de estas fuentes, asegurando un suministro más estable (Dwijendra *et al.*, 2023).

En segundo lugar, la gestión de la demanda reduce la necesidad de costosos sistemas de almacenamiento de energía. En lugar de almacenar el exceso de energía producido durante los picos de generación, la demanda puede ser ajustada para consumir esa energía directamente. Esto optimiza el uso de la energía renovable disponible y minimiza los costos asociados al almacenamiento (Badugu *et al.*, 2021). Además, permite utilizar de manera más eficiente la infraestructura de generación y distribución existente, evitando o posponiendo inversiones en nuevas capacidades de generación o transmisión. Al ajustar la demanda, se pueden maximizar los recursos disponibles sin la necesidad de expandir significativamente la infraestructura, lo que resulta en ahorros económicos y una menor huella ambiental (Yu *et al.* 2023). La gestión de la demanda también contribuye a la estabilidad de la red eléctrica al reducir picos y valles de demanda, facilitando

una operación más suave y predecible. Las variaciones rápidas en la producción de energías renovables pueden causar inestabilidad en la red, y ajustar la demanda ayuda a mitigar estos efectos, mejorando la fiabilidad del suministro eléctrico.

Un aspecto emergente en la gestión de la demanda es el rol de los “prosumers”, consumidores que también producen energía. Los prosumers, mediante la generación distribuida, como los paneles solares en hogares y empresas, pueden ajustar su consumo y producción en función de la demanda y la oferta de energía renovable (Venizelou *et al.*, 2020). Esto no solo ayuda a estabilizar la red, sino que también permite a los prosumers beneficiarse económicamente mediante la venta de su excedente de energía o la reducción de su consumo en momentos de alta demanda y precios elevados.

Almacenamiento de energía: Desarrollo de tecnologías de almacenamiento avanzadas, como baterías de ion-litio, sistemas de almacenamiento térmico y almacenamiento hidroeléctrico a gran escala

Las aplicaciones de las baterías a escala de red se estudiaron en Niet *et al.* (2018) considerando su capacidad para integrar la generación intermitente en sistemas eléctricos basados en estructuras de mercado y escenarios de despliegue. Se concluye que una mayor disminución de los precios, especialmente de las baterías, como se ha observado en años recientes, supondrá un aumento de la rentabilidad de las aplicaciones de los sistemas de almacenamiento y abrirá oportunidades para otros servicios y aplicaciones. En el norte del México existen ejemplos de bancos de baterías interconectados a la red eléctrica con una capacidad de 12.3 GWh. Adicional a esto se espera un crecimiento del 11.44% para el 2024 (Secretaría de Energía, 2023). Con el análisis de los mercados actuales y futuros de los sistemas de almacenamiento de energía se ha hecho evidente que las normas y reglamentos actuales en todos los mercados no son coherentes y tienen una gran influencia en la viabilidad económica del despliegue de las baterías.

Integración de redes inteligentes

El desarrollo e implementación de sistemas de medición inteligentes en las redes de distribución eléctrica pueden ser considerados como un factor significativo, constituyendo uno de los primeros pasos en la transición hacia las redes inteligentes (Dumitru *et al.*, 2023).

La adopción masiva de fuentes de energía renovables como se ha venido estableciendo en este texto, está impulsando la transición hacia redes eléctricas más complejas, diseñadas bajo el paradigma de la red inteligente. En este contexto, los clústeres energéticos requieren nuevas metodologías para la gestión dinámica de los recursos energéticos distribuidos, que permitan adaptarse a variables en tiempo real, optimizar la eficiencia energética, promover la formación de asociaciones y superar las barreras para una integración efectiva de las energías renovables en la red (Succetti *et al.*, 2020).

Otro problema inherente al cambio de paradigma energético está en la fiabilidad y calidad de las redes inteligentes las cuales se han vuelto fundamentales. Las técnicas de pronóstico de producción de energía renovable, especialmente en energía eólica y solar fotovoltaica, han experimentado un rápido desarrollo, en particular, en el pronóstico de producción solar fotovoltaica. En ese contexto se han aplicado diversas técnicas de aprendizaje automático e híbridas con éxito, por ejemplo, el modelo implementado como PVPNet red neuronal profunda de alta precisión denominado para pronosticar la potencia de salida del sistema fotovoltaico, entre otros sistemas integrados a la red (Huang y Kuo, 2029), o mediante el uso de modelos meteorológicos numéricos como el realizado por Prósper *et al.* (2019) y Sosa-Tinoco *et al.* (2021).

Consideraciones Políticas y Económicas

Las implicaciones ante la integración de las ERI

Las implicaciones de la integración de las ERI no son solo técnicas, también están las de carácter político y económicas. Ambas, son clave para integración de los sistemas eléctricos de potencia. Bajo este contexto, en esta sección se abordarán

los principales incentivos implementados en Latinoamérica y el Caribe (Ferroukhi *et al.*, 2023) para acelerar la integración de las ERI, así como también su transcendencia regulatoria en los países.

Incentivos: Implementación de políticas fiscales que fomenten la inversión en energías renovables y tecnologías de almacenamiento

De acuerdo con estudios realizados, seis de los 30 países más afectados por el cambio climático, pertenecen a Latinoamérica y el Caribe (Vera *et al.*, 2023). Esto llevó a la creación e implementación de instrumentos financieros y fiscales para acelerar la integración de las ERI. Los instrumentos pueden ser la inversión pública directa, inversión privada, inversión de agencias internacionales sin fines de lucro y los estímulos fiscales (Podestá *et al.*, 2022). En la Tabla 1, se muestran algunos estímulos e iniciativas implementadas en diferentes países de Latinoamérica y el Caribe.

Como se puede apreciar, el financiamiento de los estímulos e iniciativas, son el resultado de la colaboración gubernamental, organismos privados y asociaciones internacionales. El objetivo de cada estímulo va enfocado a combatir el cambio climático y así cumplir con los acuerdos y tratados a los cuales los países latinoamericanos forman parte. Los estímulos van desde hacer el uso eficiente de la energía, hasta la de diseñar e implementar proyectos de generación basada en ERI.

Integración a los mercados eléctricos

Adaptación de los marcos regulatorios para promover la participación equitativa de las ERI y garantizar la seguridad del suministro.

Aunque cada país se legisla de manera autónoma, dirigen sus acciones para combatir el cambio climático y cumplir compromiso adquirido durante el Acuerdo de París en 2015. Para reforzar este compromiso, se llevó a cabo el COP 28 con sede en Dubai, en diciembre del 2023.

Para ello, los países deben estar abiertos a adoptar nuevas prácticas en el sector del mercado eléctrico incluyendo a las ERI. Sin embargo, la

integración de las ERI a los mercados eléctricos es un reto actual, ya que, debido a su naturaleza intermitente y su limitada disponibilidad, suelen catalogarse como complicadas comparadas con las fuentes de generación convencionales como las plantas carboeléctricas, ciclo combinado y gas natural (Bersalli *et al.*, 2020). Esta característica intermitente, convierte al despacho económico, no solo en un problema de optimización y minimización de costos, sino también, en un buscador constante de soluciones y de soporte operativo novedoso que aporten la confiabilidad

operativa y la viabilidad económica necesarias para integrar correctamente a las ERI. La colaboración entre instituciones privadas, de gobierno y educativas para proponer estrategias de control y gestión que permitan la óptima integración de las ERI, se realiza de forma activa.

Según han planteado las iniciativas de organismos como la UNESCO, IRENA, GIZ, etc., los gobiernos y participantes del mercado eléctrico deben hacer la revisión y actualización continua en cuestión regulatoria de la industria eléctrica.

Tabla 1. Estímulos e iniciativas implementadas en Latinoamérica y el Caribe para acelerar la integración ERI.

País / Países	Estímulo Fiscal/Iniciativa	Objetivo	Soporte
Bolivia, Chile, Colombia, Costa Rica, Ecuador, República Dominicana, El Salvador, Guatemala, Haití, Honduras, Nicaragua, Panamá, Paraguay, Perú, Uruguay.	Renewables in Latin America and the Caribbean Initiative (RELAC).	Lograr que la energía renovable tenga una penetración del 70% para el 2030.	Agencias: IRENA, GIZ, IEA, NREL, LEDS, WWF.
Centroamérica, El Caribe, Sudamérica.	Climate Investment Platform (CIP).	Incentivar el desarrollo y financiamiento de proyectos de energías renovables.	UNDP, IRENA, SEforALL, GCF, Gobiernos, diversas instituciones financieras.
	Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA).	Adquisición y reemplazo de equipos obsoletos por equipos eficientes.	Intermediarios financieros registrados y autorizados, inversión pública, estímulos fiscales.
	Fideicomiso para el Desarrollo de la Energía Eléctrica (FIDE).	Coadyuvar en las acciones de ahorro y uso eficiente de la energía eléctrica.	Inversión pública, inversión privada, estímulos fiscales.
	Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO).	Impulsar proyectos enfocados a la producción y el uso de energías renovables en el campo mexicano.	Inversión pública directa, estímulos fiscales.

Conclusiones

La integración de ERI en las redes eléctricas presenta tanto beneficios como desafíos significativos. En términos de beneficios, las ERI contribuyen a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, diversificar la matriz energética y fomentar la innovación tecnológica en el sector eléctrico. Sin embargo, esta integración también plantea desafíos, como la intermitencia y variabilidad en la generación, la necesidad de ampliar la infraestructura eléctrica y los impactos en la estabilidad de la red. Para abordar estos desafíos, se requieren soluciones y estrategias específicas, por ejemplo, la gestión de la producción y la demanda juega un papel crucial, permitiendo ajustar la oferta y la demanda de energía de manera eficiente. Además, el almacenamiento de energía, mediante tecnologías avanzadas, proporciona una forma de mitigar la intermitencia de las ERI y mejorar la estabilidad de la red. La integración de redes inteligentes también permitirá que por medio de algoritmos de optimización y algoritmos de pronóstico se adapten adecuadamente a las fluctuaciones de la red inherentes a las fuentes de generación.

Otro punto importante son las consideraciones políticas y económicas también son fundamentales en este proceso. La implementación de incentivos financieros y fiscales, así como la adaptación de los marcos regulatorios, son necesarias para promover la integración de las ERI en los mercados eléctricos y cumplir con los compromisos internacionales en materia de cambio climático.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro sincero agradecimiento a la red de eficiencia térmica industrial RIETI-CYTED por brindarnos la oportunidad de compartir experiencias en energías renovables y enriquecernos con valiosos conocimientos de las instituciones colaboradoras. Su contribución ha sido fundamental para nuestro aprendizaje y crecimiento en este campo tan importante. Finalmente, agradecemos el trabajo de revisión efectuado por Efraín Gómez, el cual permitió mejorar la versión final de este trabajo.

Referencias

- Badugu, J., Yeddula Pedda, O., & Choppavarapu, S. B. (2021). Role of Demans Side Management in Residential Distribution Systems with the Integration of Electric Vehicles. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 16(1), 43-54. doi:<https://doi.org/10.1007/s42835-020-00566-8>
- Bersalli, G., Menanteau, P., & El-Methni, J. (2020). Renewable Energy Policy Effectiveness: A Panel Data Analysis Across Europe and Latin America. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110351>
- Bird, L., Lew, D., Milligan, M., Carlini, E., Estanqueiro, A., Flynn, D., . . . Miller, J. (2016). Wind and solar energy curtailment: A review of international experience. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 577-586. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.082>
- Castineyra, D., Yokota, J., Macchi, C., Fullone, C. L., Ferreira, B., & Schwarz, M. (2023). Transición energética y su impacto en los precios de la energía en América Latina. Retrieved from S & P Global Ratings: https://www.spglobal.com/_assets/documents/ratings/es/pdf/2023/2023-12-06-transicion-energetica-y-su-impacto-en-los-precios-de-la-energia-en-america-latina.pdf
- Chen, Y., & Wei, W. (2023). Robust Generation Dispatch With Strategic Renewable Power Curtailment and Decision-Dependent Uncertainty. *IEEE Transactions on Power Systems*, 38(5), 4640-4654. doi:<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2022.3214856>

- Cosgrove, P., Roulstone, T., & Zachary, S. (2023). Intermittency and periodicity in net-zero renewable energy systems with storage. *Renewable Energy*, 212, 299-307. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.135>
- Dumitru, C.-D., Gligor, A., Vlasa, I., Simo, A., & Dzitac, S. (2023). Energy Contour Forecasting Optimization with Smart Metering in Distribution Power Networks. *Sensors*, 23(3). doi:<https://doi.org/10.3390/s23031490>
- Dwijendra, N. K., Anupong, W., Althahabi, A. M., Abdulameer, S. A., Al-Azzawi, W. K., Jaber, M. M., . . . Al Mashhadani, Z. I. (2023). Optimal Dispatch of the Energy Demand in Electrical Distribution Grid with Reserve Scheduling. *Environmental and Climate Technologies*, 27(1), 80-91. doi:<https://doi.org/10.2478/rtuect-2023-0007>
- Engeland, K., Borga, M., Creutin, J. D., Françoise, B., Ramos, M. H., & Vidal, J. P. (2017). Space-time variability of climate variables and intermittent renewable electricity production - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 600-617. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.046>
- Farah, P. D. (2021). Strategies to Balance Energy Security, Business, Trade and Sustainable Development. *SSRN*, 13(2), 95-99. doi:<https://doi.org/10.2139/ssrn.3658668>
- Ferroukhi, R., Kieffer, G., & López-Peña, Á. (2023). Renewable Energy Market Analysis: Latin America. IRENA. Retrieved from https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_Market_Analysis_Latin_America_2016.pdf?rev=76cc15c58ba34c648b84209168740ce7
- Gitelman, L., Kozhevnikov, M., & Visotskaya, Y. (2023). Diversification as a Method of Ensuring the Sustainability of Energy Supply within the Energy Transition. *Resources*, 12(2). doi:<https://doi.org/10.3390/resources12020019>
- Huang, C.-J., & Kuo, P.-H. (2019). Multiple-Input Deep Convolutional Neural Network Model for Short-Term Photovoltaic Power Forecasting. *IEEE Access*, 7, 74822-74834. doi:<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2921238>
- Jenss, A. C. (2021). Gobernanza de la expansión: Infraestructuras transnacionales de energía en América Latina. *Perfiles Latinoamericanos*, 29(58). doi:<https://doi.org/10.18504/pl2958-007-2021>
- Khalid, M. (2024). Smart grids and renewable energy systems: Perspectives and grid integration challenges. *Energy Strategy Reviews*, 51. doi:<https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101299>
- Li, L., Lin, J., Wu, N., Xie, S., Meng, C., Zheng, Y., . . . Zhao, Y. (2022). Review and outlook on the international renewable energy development. *Energy and Built Environment*, 3(2), 139-157. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2022.12.002>
- Mlilo, N., Brown, J., & Ahfock, T. (2021). Impact of intermittent renewable energy generation penetration on the power system networks - A review. *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy*, 6(1). doi:<https://doi.org/10.1007/s40866-021-00123-w>
- Mokeke, S., & Thamae, L. Z. (2021). The impact of intermittent renewable energy generators on Lesotho national electricity grid. *Electric Power Systems Research*, 196. doi:<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107196>

- Montoya Martín del Campo, A. (2022). Transición Energética Soberana y litio como área estratégica, en la Iniciativa de reforma a los artículos 25, 27 y 28 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (Foro 16). Ciudad de México: H. Cámara de Diputados.
- Niet, T., Lyseng, B., English, J., Keller, V., Palmer-Wilson, K., Robertson, B., . . . Rowe, A. (2018). Valuing infrastructure investments to reduce curtailment. *Energy Strategy Reviews*, 22, 196-206. doi:<https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.08.010>
- Oliveiro, A., Díaz Echeverría, A., Afonso, N., Sánchez Campos, A., & Bordiu García-Ovies, C. (2023). Hoja de ruta para la transformación digital del sector energético en América Latina y el Caribe. BID. Retrieved from <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Hoja-de-ruta-para-la-transformacion-digital-del-sector-energetico-en-America-Latina-y-el-Caribe.pdf>
- Podestá, A., Eirin, M. S., Contreras Lisperguer, R., & Salgado Pavez, R. (2022). Políticas de atracción de inversiones para el financiamiento de la energía limpia en América Latina. CEPAL. Retrieved from <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/4e3ed738-06ee-45cc-9f79-7c2457b327bc/content>
- Prósper, M. A., Sosa Tinoca, I., Otero-Casal, C., & Miguel-Macho, G. (2019). Downslope windstorms in the Isthmus of Tehuantepec during Tehuantepecer events: A numerical study with WRF high-resolution simulations. *Earth System Dynamics*, 10(3), 485-499. doi:<https://doi.org/10.5194/esd-10-485-2019>
- Secretaría de Energía. (2023). Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2023-2037. Secretaría de Energía. Retrieved from <https://www.gob.mx/sener/articulos/programa-de-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-2023-2037>
- Seriño, M. N. (2022). Energy security through diversification of non-hydro renewable energy sources in developing countries. *Energy & Environment*, 33(3), 546-561. doi:<https://doi.org/10.1177/0958305X211013452>
- Song, Y., Shahzad, U., & Paramati, S. R. (2023). Impact of energy infrastructure investments on renewable electricity generation in major Asian developing economies. *Australian Economic Papers*, 62(1), 1-23. doi:<https://doi.org/10.1111/1467-8454.12282>
- Sosa Tinoco, I., Prosper, M. A., & Miguel-Macho, G. (2021). Development of a solar energy forecasting system for two real solar plants based on WRF Solar aerosol input and a solar plant model. *Solar Energy*, 120, 329-341. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.05.049>
- Succetti, F., Rosato, A., Araneo, R., & Panella, M. (2020). Deep Neural Networks for Multivariate Prediction of Photovoltaic Power Time Series. *IEEE Access*, 8, 490-505. doi:<http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3039733>
- Venizelou, V., Makrides, G., Efthymiou, V., & Georghiou, G. E. (2020). Methodology for deploying cost-optimum price-based demand side management for residential prosumers. *Renewable Energy*, 153, 228-240. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.025>

- Vera, F., Uribe, M. C., & del Castillo, S. (2023). Accion climática y Acuerdo de París: El rol de las ciudades de América Latina y el Caribe. Retrieved from Publicaciones - BID: <https://publications.iadb.org/es/publications/spanish/viewer/Accion-climatica-y-Acuerdo-de-Paris-el-rol-de-las-ciudades-de-America-Latina-y-el-Caribe.pdf>
- Wang, W., Huang, S., Zhang, G., Liu, J., & Chen, Z. (2021). Optimal Operation of an Integrated Electricity-Heat Energy System Considering Flexible Resources Dispatch for Renewable Integration. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 9(4), 699-710. doi:<https://doi.org/10.35833/MPCE.2020.000917>
- Yu, B., Fang, D., Xiao, K., & Pan, Y. (2023). Drivers of renewable energy penetration and its role in power sector's deep decarbonization towards carbon peak. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 178. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113247>
- Yuan, Q., Zhou, K., & Yao, J. (2020). A new measure of wind power variability with implications for the optimal sizing of standalone wind power systems. *Renewable Energy*, 150, 538-549. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.121>

Manuscrito recibido: 12 de agosto de 2024

Recepción del manuscrito corregido: 18 de noviembre de 2024

Manuscrito aceptado: 21 de noviembre de 2024