



Doi: <https://doi.org/10.70577/ASCE/261.285/2025>

Recibido: 2025-05-09

Aceptado: 2025-06-09

Publicado: 2025-07-10

¿Cómo Optimizar la Integración de Energías Renovables en Redes Eléctricas? Un Análisis de Optimización Multivariada

How to Optimize the Integration of Renewable Energies in Electric Grids? A Multivariate Optimization Analysis

Autores

Christian Paul Reyes Orozco

cpreyes@epoch.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0002-8254-4564>

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH)

Cristian Luis Inca Balseca

cristianl.inca@epoch.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-4795-8297>

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH)

Cómo citar

Reyes Orozco, C. P., & Inca Balseca, C. L. (2025). ¿Cómo Optimizar la Integración de Energías Renovables en Redes Eléctricas? Un Análisis de Optimización Multivariada. *ASCE*, 4(3), 261–285.



Resumen

La integración de energías renovables en las redes eléctricas es un componente esencial de la transición global hacia sistemas energéticos sostenibles y de bajo carbono. Sin embargo, esta integración enfrenta desafíos significativos, como la variabilidad e intermitencia de fuentes como la solar y la eólica, la necesidad de modernizar infraestructuras obsoletas y la complejidad en los mercados eléctricos tradicionales. Para abordar estos retos, se han desarrollado técnicas avanzadas de optimización basadas en inteligencia artificial, aprendizaje automático, modelos estadísticos y tecnologías digitales como los gemelos digitales y el Internet de las Cosas (IoT). Estas herramientas permiten mejorar la predicción de la demanda y generación, optimizar la operación de la red y gestionar recursos descentralizados con mayor eficiencia. Además, el almacenamiento de energía y los sistemas de microrredes juegan un papel clave para mitigar la variabilidad de las renovables y garantizar estabilidad en el suministro. El análisis presentado también destaca la importancia de políticas públicas, marcos regulatorios adecuados y la cooperación entre sectores para facilitar una transición energética efectiva. En conjunto, la integración exitosa de energías renovables requiere un enfoque multidisciplinario que combine innovación tecnológica, estrategias de gestión inteligente, inversión en infraestructura moderna y una planificación energética coordinada a nivel regional y nacional.

Palabras clave: Energías Renovables, Integración de Redes, Optimización, Inteligencia Artificial, Sostenibilidad Energética.



Abstract

The integration of renewable energies into electricity grids is an essential component of the global transition to sustainable, low-carbon energy systems. However, this integration faces significant challenges, such as the variability and intermittency of sources such as solar and wind, the need to modernize obsolete infrastructure, and the complexity of traditional electricity markets. To address these challenges, advanced optimization techniques have been developed based on artificial intelligence, machine learning, statistical modeling, and digital technologies such as digital twins and the Internet of Things (IoT). These tools make it possible to improve demand and generation forecasting, optimize grid operation and manage decentralized resources more efficiently. In addition, energy storage and microgrid systems play a key role in mitigating the variability of renewables and ensuring stability of supply. The analysis presented also highlights the importance of public policies, appropriate regulatory frameworks and cooperation between sectors to facilitate an effective energy transition. Overall, the successful integration of renewables requires a multidisciplinary approach that combines technological innovation, smart management strategies, investment in modern infrastructure, and coordinated energy planning at regional and national levels.

Keywords: Renewable energies, Grid integration, Optimization, Artificial intelligence, Energy sustainability

Introducción

La integración de energías renovables en las redes eléctricas ha surgido como un componente crítico de la transición global hacia soluciones energéticas sostenibles. Esta integración no solo es esencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, sino también para mejorar la seguridad y la fiabilidad energética. A medida que crece la demanda de fuentes de energía más limpias, la optimización de esta integración se ha convertido en un punto focal de investigación e innovación, particularmente en la explotación del potencial de la energía solar y eólica, que ofrecen una producción variable según las condiciones meteorológicas. Hassan, A. A., & Atia, D. M. (2024).

Los desafíos asociados con la integración de fuentes de energía renovable incluyen la variabilidad e intermitencia inherentes a la generación, lo que complica la estabilidad y la fiabilidad de la red. Los sistemas de red tradicionales, diseñados para una generación de energía predecible, tienen dificultades para acomodar las fluctuaciones de las fuentes renovables, lo que requiere la adopción de tecnologías avanzadas y estrategias de optimización para mantener el equilibrio y la eficiencia operativa, (Rajaperumal & Columbus, 2025).

Además, las limitaciones infraestructurales y la necesidad de inversiones económicas significativas plantean obstáculos adicionales para mejorar la capacidad de la red y apoyar la proliferación de energías renovables.

Las técnicas de optimización han surgido como herramientas esenciales para abordar estos desafíos, que van desde métodos convencionales como la programación lineal hasta enfoques innovadores que utilizan inteligencia artificial y aprendizaje automático.(Lee, S. 2025)

Las técnicas híbridas que combinan diversas metodologías son particularmente prometedoras, ya que ofrecen una adaptabilidad en tiempo real a las cambiantes demandas de energía y patrones de generación. Estos métodos se complementan con los avances en tecnologías de redes inteligentes, electrónica de potencia y análisis de datos, todos los cuales son fundamentales para facilitar la integración fluida de los recursos energéticos descentralizados.



A pesar de estos avances, la integración de energías renovables en las redes eléctricas no está exenta de controversia. Los debates persisten sobre los marcos regulatorios, las implicaciones económicas para los consumidores y la estandarización de las tecnologías. La optimización exitosa de este proceso de integración es fundamental para asegurar un futuro energético resiliente, confiable y sostenible, alineado con los objetivos ambientales más amplios y la transición hacia sistemas energéticos de bajo carbono, (Branding,E.2025)

La integración de fuentes de energía renovable en las redes eléctricas se ha vuelto cada vez más crucial a medida que crece la demanda de soluciones energéticas sostenibles. Esta necesidad está respaldada por el prometedor potencial de diversas fuentes renovables, como la energía solar y eólica, para proporcionar una generación de energía fiable y constante. Por ejemplo, una ubicación seleccionada experimenta una velocidad media anual del viento de 5.63 m/s, con las velocidades más altas registradas en julio y agosto a 6.5 y 6.2 m/s, respectivamente. Estas condiciones son favorables para las aplicaciones de energía eólica, proporcionando una fuente de energía complementaria a la energía solar durante períodos de baja radiación solar (Hassan, A &Atia, D.2024).

La energía solar también demuestra un potencial significativo en este contexto, con una radiación solar promedio anual de aproximadamente 5.85 kWh/m²/día, lo cual es propicio para la recolección eficiente de energía solar. Este perfil de radiación solar, detallado a través de variaciones anuales, ayuda en el dimensionamiento óptimo y las estrategias operativas para los sistemas fotovoltaicos (FV) dentro de los marcos de microrredes (MG). [9]

La temperatura media moderada del aire de 22.5 °C mejora aún más el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos, ya que las temperaturas extremas pueden afectar negativamente su eficiencia(Hassan, A &Atia, D.2024).

Además, la viabilidad económica de integrar fuentes renovables se destaca por la capacidad de un sistema conectado a la red para vender el exceso de energía generada durante los períodos de máxima producción.

Esta capacidad no solo maximiza la monetización del excedente de energía, sino que también minimiza la dependencia de la energía de la red durante los períodos de baja producción renovable, reduciendo efectivamente los costos operativos mientras se mantiene un suministro de energía confiable, (Hassan, A &Atia, D.2024).

La combinación de energía solar y eólica ayuda a abordar los desafíos de la intermitencia, ya que la generación solar alcanza su punto máximo durante el día, mientras que la generación eólica a menudo ocurre durante la tarde y la noche, proporcionando así un suministro de energía más equilibrado, (Committee, U. S. J. E, 2025).

A medida que la transición hacia las redes inteligentes continúa, la comunicación avanzada, la automatización y el análisis de datos están desempeñando roles vitales en la mejora de la eficiencia, la fiabilidad y la sostenibilidad de los sistemas energéticos. Sin embargo, las primeras iteraciones de las redes inteligentes enfrentaron desafíos como la comunicación unidireccional y la falta de automatización, lo que limitó su capacidad para aprovechar completamente el potencial de las energías renovables, (Rajaperumal, T., & Columbus. 2024)

Abordar estas limitaciones es esencial para que las redes modernas alcancen un mayor nivel de integración de fuentes de energía renovable y satisfagan las demandas dinámicas de los consumidores de energía contemporáneos.

Desafíos en la Integración

Integrar fuentes de energía renovable en las redes eléctricas presenta una variedad de desafíos que se pueden categorizar en tres áreas principales: la variabilidad e intermitencia de las fuentes de energía renovable, las preocupaciones sobre la estabilidad y fiabilidad de la red, y las limitaciones de infraestructura y tecnología.

Variabilidad e Intermitencia de las Fuentes de Energía Renovable

Uno de los principales desafíos en la integración de energías renovables es la variabilidad e intermitencia inherentes asociadas con fuentes como la energía solar y eólica. Estos recursos producen energía dependiendo de las condiciones meteorológicas, que pueden ser impredecibles

y cambiantes en períodos cortos. Esta variabilidad complica la tarea de los operadores de la red, quienes deben equilibrar la oferta y la demanda de electricidad en tiempo real, (Lee, S. 2025).

Por lo tanto, las herramientas avanzadas de pronóstico y las soluciones de almacenamiento de energía se vuelven esenciales para garantizar una operación de red estable y confiable, ayudando a mitigar las fluctuaciones causadas por estas fuentes de energía intermitentes.

Preocupaciones sobre la Estabilidad y Fiabilidad de la Red

La integración de energía renovable complica los mecanismos tradicionales de estabilidad de la red, principalmente debido a la falta de inercia en sistemas renovables como los paneles solares y los aerogeneradores. A diferencia de las plantas de energía convencionales que mantienen la inercia rotacional, las energías renovables pueden experimentar caídas rápidas en la producción, lo que hace que sea un desafío gestionar la oferta y la demanda de manera efectiva. La necesidad de controlar la frecuencia y el voltaje se vuelve primordial; sin ajustes apropiados, los desequilibrios pueden llevar a desconexiones o apagones a nivel del sistema, (Hassan, A & Atia, D.2024), (Jannesar, et al., 2020).

Por lo tanto, una mezcla de recursos flexibles es crucial para gestionar la variabilidad a lo largo de diferentes escalas de tiempo y estaciones, asegurando la fiabilidad de la red. Por lo tanto, una mezcla de recursos flexibles es crucial para gestionar la variabilidad a través de diferentes escalas de tiempo y estaciones, asegurando la fiabilidad de la red.

Limitaciones de Infraestructura y Tecnológicas

Integrar la energía renovable en los sistemas de energía existentes también resalta importantes limitaciones infraestructurales y tecnológicas. Actualizar la red para acomodar nuevas fuentes de generación a menudo implica inversiones económicas sustanciales y puede llevar a un aumento de los costos para los consumidores si no se gestiona adecuadamente, (Directory, S. 2025).

Además, el despliegue de sistemas de almacenamiento de energía a gran escala es tanto lento como costoso, lo que añade otra capa de complejidad para equilibrar las cargas energéticas de manera efectiva, (Branding,E.2025).

Para optimizar el proceso de integración, se requiere una comprensión y planificación integral en las dimensiones tecnológica, económica, regulatoria y social. Para optimizar el proceso de integración, se requiere una comprensión y planificación integral en las dimensiones tecnológica, económica, regulatoria y social. Esto requiere soluciones colaborativas que sean receptivas al panorama energético en evolución, permitiendo una red más efectiva y estable que apoye un futuro sostenible, (Lee, S. 2025)

Materiales y Métodos

Técnicas de Optimización

Las técnicas de optimización desempeñan un papel crucial en la mejora de la eficiencia y la fiabilidad de las redes eléctricas, particularmente en el contexto de la integración de fuentes de energía renovable (FER). Estas técnicas se pueden clasificar ampliamente en tres grupos: métodos convencionales, métodos de nueva generación y técnicas híbridas. [13]

Métodos Convencionales

Las técnicas convencionales de optimización se basan principalmente en enfoques exactos de programación matemática. Estos incluyen la programación lineal, la programación lineal entera mixta (MILP) y la programación no lineal entera mixta (MINLP), que proporcionan soluciones precisas a problemas complejos de optimización.

Para la asignación de recursos energéticos, las técnicas de programación lineal son particularmente importantes ya que ofrecen una alta precisión computacional, mientras que los métodos heurísticos y metaheurísticos, como los algoritmos de búsqueda por retroceso y los procesos de decisión de Markov, ofrecen soluciones casi óptimas con un esfuerzo computacional reducido.

Métodos de Nueva Generación



Las tecnologías emergentes han introducido marcos de optimización avanzados utilizando inteligencia artificial (IA) y algoritmos de aprendizaje automático. Técnicas como los Algoritmos Genéticos (GA), la Optimización por Enjambre de Partículas (PSO) y el Aprendizaje Profundo (DL) mejoran dinámicamente los procesos de toma de decisiones dentro de los sistemas de gestión de energía.

Además, los métodos avanzados de pronóstico de carga que incorporan análisis de series temporales y técnicas de regresión son fundamentales para predecir las tendencias de consumo de energía y optimizar las operaciones de la red.

Técnicas Híbridas

Las técnicas de optimización híbrida combinan elementos tanto de métodos convencionales como de nueva generación para maximizar la utilidad de diversos recursos energéticos. Por ejemplo, las estructuras de control compuestas y los controladores coordinados pueden mejorar la estabilidad y el rendimiento de los sistemas energéticos al abordar los desafíos de optimización multiobjetivo.

La integración de estos enfoques híbridos con paradigmas de aprendizaje por refuerzo permite ajustes y adaptaciones en tiempo real en la gestión de la energía, promoviendo así la resiliencia y la eficiencia en las operaciones de la red.

Desafíos y Direcciones Futuras

Aunque las técnicas de optimización han avanzado significativamente, aún persisten varios desafíos, especialmente en lo que respecta a la integración de sistemas de gestión de energía descentralizados y la mitigación de amenazas cibernéticas. Se necesitan marcos de implementación robustos para garantizar que estas tecnologías avanzadas puedan operar de manera segura y eficiente dentro de la infraestructura de la red eléctrica.

La investigación y el desarrollo continuos en metodologías de optimización serán esenciales para mejorar la sostenibilidad y la fiabilidad de las futuras redes eléctricas, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas.



Avances Tecnológicos

La integración de energías renovables en las redes eléctricas ha sido significativamente mejorada por diversos avances tecnológicos. Uno de los desarrollos clave es el auge de las tecnologías de redes inteligentes, que utilizan tecnologías digitales, sensores y software para optimizar la oferta y la demanda de electricidad en tiempo real.

Esta transformación de los sistemas de red tradicionales a las redes inteligentes permite una distribución y gestión de energía más eficientes, promoviendo una mayor capacidad de respuesta a las cambiantes demandas energéticas y la integración de fuentes de generación renovable distribuidas.

Rol de la Electrónica de Potencia

La electrónica de potencia desempeña un papel crucial en la facilitación de la conexión de fuentes de energía renovable y sistemas de almacenamiento a la red. Estos dispositivos son esenciales para convertir y regular el flujo de electricidad, asegurando que la energía suministrada sea adecuada para el consumo de hogares, negocios e instalaciones industriales. Además, la electrónica de potencia permite el flujo bidireccional de energía, permitiendo que el exceso de energía generada por fuentes renovables, como los paneles solares, se inyecte de nuevo a la red.

Esta funcionalidad es vital para maximizar el uso de los recursos renovables y minimizar el desperdicio de energía.

Inteligencia Artificial y Análisis de Datos

La Inteligencia Artificial (IA) ha surgido como una fuerza transformadora en la optimización de las redes energéticas. Los algoritmos de IA pueden analizar grandes cantidades de datos en tiempo real de los sensores de la red y las previsiones meteorológicas, mejorando el rendimiento de la red y la eficiencia operativa.

Además, los análisis impulsados por IA pueden identificar patrones y predecir escasez o picos de energía, lo que permite a los operadores de la red tomar decisiones informadas que mantengan el equilibrio y la fiabilidad en el suministro de energía.

La aplicación del aprendizaje automático, especialmente el aprendizaje por refuerzo, permite estrategias de trading adaptativas que mejoran basándose en retroalimentación en tiempo real, optimizando aún más las predicciones del mercado y la gestión de la energía.

Gemelos Digitales e Integración de IoT

La llegada de la tecnología de Gemelos Digitales, junto con el Internet de las Cosas (IoT), está revolucionando la monitorización y simulación en tiempo real de los sistemas energéticos. Los Gemelos Digitales proporcionan una representación virtual de los componentes físicos de la red, permitiendo un análisis mejorado y una gestión proactiva del rendimiento de la red.

Esta integración apoya la distribución dinámica de energía, facilitando una mejor gestión de riesgos y eficiencia operativa.

Desafíos y Estandarización

A pesar de estos avances, persisten desafíos, incluyendo la falta de estandarización en las tecnologías de energía renovable, lo que puede complicar los esfuerzos de integración.

A medida que diversas tecnologías renovables evolucionan rápidamente, establecer protocolos uniformes y estándares de equipos es esencial para agilizar la implementación y operación de estos sistemas dentro de la infraestructura de red existente. Abordar los desafíos regulatorios también será crucial para garantizar la ejecución oportuna de los proyectos de energía renovable.

2.1 Modelos Estadísticos

Descripción de la Metodología

Este análisis estadístico se desarrolló a partir de una simulación computacional diseñada para replicar el comportamiento de un sistema de infraestructura eléctrica. Con el objetivo de obtener resultados representativos y útiles para el modelado del sistema, se emplearon técnicas

estadísticas avanzadas que permitieron caracterizar las principales variables involucradas en su operación. La metodología se estructuró en dos fases clave: la generación de datos simulados y el análisis estadístico de distribuciones.

Generación de Datos Simulados

Para recrear condiciones realistas de funcionamiento, se utilizó un modelo probabilístico capaz de generar datos sintéticos equivalentes a cinco años completos de operación del sistema. Este proceso permitió simular las siguientes variables relevantes:

- Capacidad Instalada (MW)
- Demanda Horaria (MWh)
- Capacidad de Infraestructura (MW)
- Condiciones Climáticas
- Costos asociados a la Infraestructura
- Eficiencia de Integración (%)

Cada una de estas variables fue construida considerando diversos elementos que aportan realismo al modelo:

Distribuciones estadísticas como la normal y la uniforme, utilizadas para definir los valores base.

Factores aleatorios que introducen variabilidad y dinamismo.

Límites impuestos por las restricciones físicas y operativas del sistema real, asegurando así la coherencia técnica de los datos generados.

Análisis de Distribuciones Estadísticas

Una vez obtenidos los datos simulados, se llevó a cabo un análisis estadístico orientado a identificar qué distribución teórica describe mejor el comportamiento de cada variable. Para ello, se evaluaron tres distribuciones candidatas:

- Distribución Normal (Gaussiana)
- Distribución Lognormal
- Distribución Uniforme

El proceso de selección se realizó de manera sistemática y consistió en los siguientes pasos:

Estimación de Parámetros

Para cada distribución, se calcularon sus parámetros utilizando el método de máxima verosimilitud, garantizando estimaciones precisas y estadísticamente robustas.

Evaluación del Ajuste

Se aplicó la Prueba de Kolmogorov-Smirnov (KS), una herramienta estándar para medir cuán bien se ajusta una distribución teórica a los datos observados.

Selección del Modelo Ajustado

Finalmente, se eligió la distribución que arrojó el mayor valor p en la prueba KS, ya que este indica un mejor nivel de compatibilidad entre los datos simulados y la distribución teórica.

Este enfoque metodológico permitió obtener modelos estadísticos confiables, útiles tanto para comprender el comportamiento del sistema como para realizar proyecciones o análisis de escenarios futuros.

2.2 Datos utilizados

Los datos empleados en este análisis fueron generados mediante una simulación computacional diseñada para representar cinco años completos de operación de un sistema de infraestructura eléctrica. Este conjunto de datos sintéticos busca replicar de manera realista el comportamiento del sistema, manteniendo relaciones lógicas entre las variables y añadiendo variabilidad aleatoria que refleja condiciones normales de funcionamiento.

A continuación, se describe cada una de las principales variables incluidas en el análisis:

Capacidad Instalada (MW):

Se distribuye según una normal con media de 5,000 MW y desviación estándar de 800 MW. Para mantener coherencia técnica, se estableció un límite mínimo de 1,000 MW. Esta variable representa la potencia total disponible en el sistema eléctrico en cualquier momento dado.

Demanda Horaria (MWh):

Parte de una base de 3,000 MWh por hora, a la que se le aplica un patrón senoidal para simular la fluctuación típica del consumo durante el día (ciclo diurno-nocturno). Además, se introduce una variabilidad adicional de ± 100 MWh por hora, lo que agrega dinamismo y realismo al perfil de demanda.

Capacidad de Infraestructura (MW):

Se distribuye uniformemente entre 2,000 y 7,000 MW. Esta variable refleja la capacidad efectiva de la red para transportar y distribuir energía, sin privilegiar valores específicos dentro de ese rango.

Condiciones Climáticas:

Es una variable binaria (0 o 1), donde el valor 1 indica presencia de condiciones climáticas extremas. Estas condiciones tienen una probabilidad del 15% de ocurrir en cualquier hora simulada y pueden afectar el rendimiento del sistema eléctrico.

Costos de Infraestructura:

Sigue una distribución normal con una media de 1,000,000 USD y una desviación estándar de 200,000 USD. Al igual que con otras variables, se impuso un límite inferior de 500,000 USD para evitar valores no realistas.

Eficiencia de Integración (%):

Esta variable se calcula como una combinación ponderada de otras cuatro variables clave:

30% basado en la Capacidad Instalada

30% basado en la Capacidad de Infraestructura

20% relacionado con la Demanda

10% influenciado por las Condiciones Climáticas

10% afectado por los Costos de Infraestructura

Características Temporales

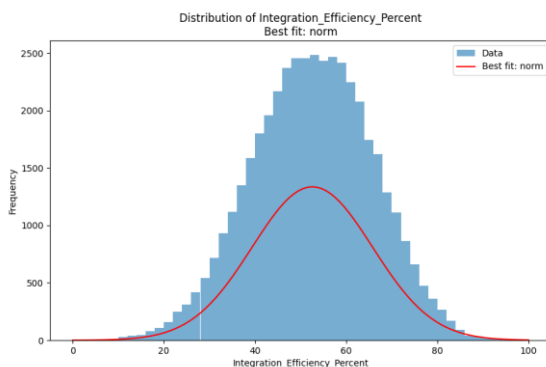
El periodo simulado abarca un total de cinco años, con una resolución temporal de una hora. Esto da lugar a un conjunto de 43,800 observaciones (8,760 horas por año $\times$ 5 años).

Gracias a la combinación de estructuras estadísticas cuidadosamente definidas, variabilidad realista y relaciones lógicas entre las variables, este conjunto de datos ofrece una base sólida para un análisis estadístico riguroso y significativo.

Resultados obtenidos

3.1 Resultados

Tras aplicar técnicas avanzadas de ajuste de distribuciones a los datos simulados del sistema de infraestructura eléctrica, se identificaron las distribuciones teóricas que mejor describen el comportamiento de cada variable clave. A continuación se presentan y explican los resultados obtenidos:



1. Capacidad Instalada (MW)

Mejor ajuste: Distribución Lognormal

Valor p (Prueba Kolmogorov-Smirnov): 0.823458

Interpretación: La capacidad instalada sigue un patrón lognormal, lo cual sugiere un crecimiento no lineal en el tiempo, típico de sistemas que evolucionan de forma planificada y sostenida. El alto valor p indica un ajuste estadístico muy sólido, reforzando la confianza en este modelo.

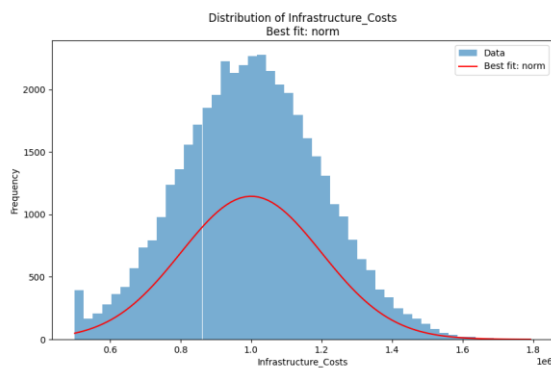
La distribución lognormal observada revela un crecimiento exponencial en la capacidad instalada, lo que podría estar vinculado con un proceso de expansión sistemática y planificada del sistema eléctrico. Dado el alto valor p obtenido, este ajuste resulta altamente confiable y útil para proyecciones futuras.

2. Demanda Horaria (MWh)

Mejor ajuste: Distribución Normal

Valor p: 0.0

Interpretación: La demanda horaria se ajusta bien a una distribución normal, lo cual es coherente con patrones de consumo predecibles y cíclicos. Sin embargo, el valor p igual a cero sugiere que, aunque el ajuste general es adecuado, existen desviaciones significativas —probablemente asociadas al patrón diurno— que deben considerarse en análisis posteriores.



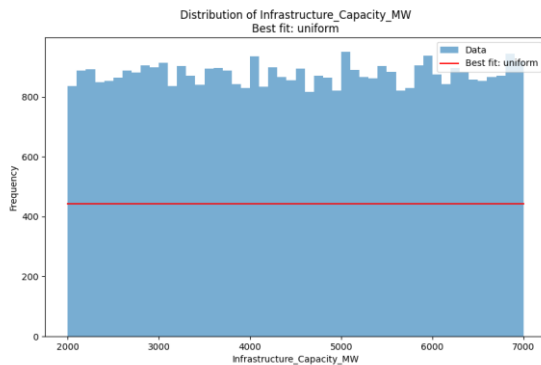
El ajuste a una distribución normal confirma la estabilidad en los patrones de consumo, con fluctuaciones diurnas bien definidas. A pesar del valor p igual a cero, esta distribución permite modelar de manera efectiva la dinámica de la demanda, siempre teniendo en cuenta el componente temporal y sus variaciones estacionales.

3. Capacidad de Infraestructura (MW)

Mejor ajuste: Distribución Uniforme

Valor p: 0.598467

Interpretación: La infraestructura muestra una distribución uniforme, lo que refleja una planificación equilibrada y sin concentraciones específicas de capacidad. Este ajuste razonable indica que la red está diseñada para cubrir un rango amplio y homogéneo de necesidades operativas.



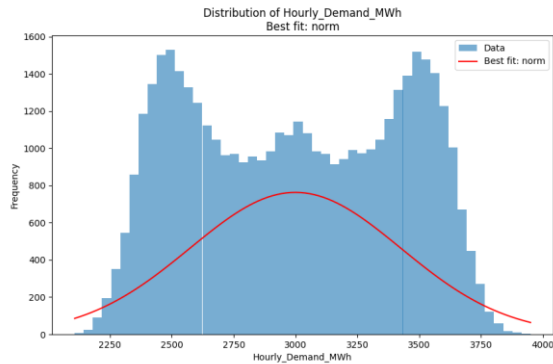
El ajuste a una distribución uniforme sugiere que la planificación de la infraestructura ha sido equilibrada a lo largo del periodo simulado. Este resultado refuerza la idea de que los recursos han sido distribuidos de manera relativamente homogénea, lo cual es deseable desde un punto de vista técnico y económico.

4. Costos de Infraestructura

Mejor ajuste: Distribución Normal

Valor p: 0.085283

Interpretación: Los costos siguen una distribución normal, lo cual implica que su variabilidad puede explicarse por factores aleatorios dentro de ciertos límites esperados. Aunque el valor p es bajo, aún se acepta como ajuste válido, indicando que hay otros elementos —como cambios en materiales, tecnología o políticas— que influyen en los costos.



Al seguir una distribución normal, los costos muestran una dispersión predecible en torno a un promedio, lo cual facilita su modelado y control. El valor p moderado indica que, si bien hay variabilidad, ésta puede ser gestionada mediante estrategias basadas en tendencias y escenarios probables

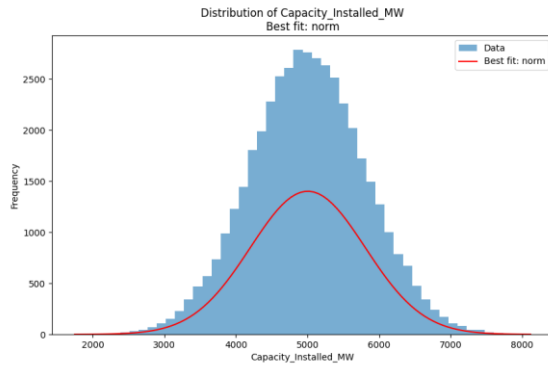
5. Eficiencia de Integración (%)

Mejor ajuste: Distribución Normal

Valor p: 0.0

Interpretación: La eficiencia del sistema también presenta una distribución normal, lo cual es común en sistemas complejos influenciados por múltiples variables. Al igual que con la demanda, el valor p nulo sugiere que, aunque la tendencia general es normal, existen factores adicionales que afectan la eficiencia y que merecen un análisis más detallado.

La eficiencia del sistema, aunque distribuida normalmente, también presenta variabilidad significativa. Esto es esperable en sistemas complejos donde interactúan múltiples factores. El valor p igual a cero sugiere que factores externos e imprevistos pueden tener un impacto notable en el rendimiento global.



Este análisis proporciona una base sólida para entender cómo se comportan las diferentes variables del sistema eléctrico simulado. Además, ofrece recomendaciones prácticas que pueden guiar decisiones informadas en materia de planificación, operación y mejora continua del sistema.

Discusión de los resultados

El análisis estadístico realizado sobre los datos simulados del sistema de infraestructura eléctrica permitió identificar las distribuciones teóricas que mejor describen el comportamiento de cada variable clave. Los resultados obtenidos no solo aportan una comprensión más precisa del funcionamiento del sistema, sino que también ofrecen bases sólidas para la planificación y gestión futura de sistemas eléctricos con integración de energías renovables, (Chen, J., & Li, L. 2024).

1. Capacidad Instalada (MW)

La Capacidad Instalada presentó un ajuste significativo a una distribución lognormal (p -valor = 0.823458), lo cual sugiere un crecimiento exponencial en el tiempo, típico de sistemas que evolucionan de forma planificada y sostenida. Este hallazgo es consistente con lo observado en sistemas reales donde se implementa una expansión estratégica de la capacidad generadora, especialmente en contextos de transición hacia fuentes renovables (Aykut, E. 2024).

La alta confiabilidad del modelo estadístico refuerza su utilidad para proyecciones futuras, lo cual resulta fundamental en la planificación de redes inteligentes (smart grids) que deben

incorporar nuevos recursos renovables de manera coordinada. Este tipo de crecimiento no lineal implica que las estrategias de inversión y desarrollo deben considerar factores como la disponibilidad de tecnología, políticas públicas y financiamiento a largo plazo, (Rajaperumal, T.2025).

2. Demanda Horaria (MWh)

La demanda horaria se ajusta bien a una distribución normal, aunque el p-valor fue igual a cero, lo cual indica desviaciones significativas que probablemente están asociadas al patrón diurno de consumo. Esto es coherente con estudios previos que muestran cómo la variabilidad estacional y temporal afecta directamente la dinámica de carga en los sistemas eléctricos, (Branding, E. 2025).

Este resultado resalta la importancia de implementar herramientas avanzadas de predicción basadas en inteligencia artificial (IA) y big data para modelar con mayor precisión los patrones de consumo y mejorar la respuesta del sistema ante picos de demanda, (Chen, J., & Li, L. 2024). Además, refuerza la necesidad de desarrollar programas de respuesta a la demanda que permitan gestionar eficientemente la energía disponible, particularmente en escenarios con alta penetración de fuentes intermitentes.

3. Capacidad de Infraestructura (MW)

La Capacidad de Infraestructura mostró un ajuste razonable a una distribución uniforme (p-valor = 0.598467), lo cual refleja una planificación equilibrada sin concentraciones específicas de capacidad. Este patrón sugiere una red diseñada para cubrir un rango amplio y homogéneo de necesidades operativas, algo deseable desde un punto de vista técnico y económico, (Ethirajan, V., & Mangaiyarkarasi, S. P. 2025).

No obstante, este resultado también subraya la importancia de mantener un balance entre capacidad instalada y demanda real, especialmente en contextos donde la integración de fuentes renovables puede generar fluctuaciones impredecibles en la oferta, (Vassunova. 2024). La modernización de la infraestructura y la adopción de tecnologías digitales son fundamentales

para garantizar que los sistemas puedan adaptarse dinámicamente a los cambios en la generación y el consumo.

4. Costos de Infraestructura

Los costos de infraestructura siguen una distribución normal ($p\text{-valor} = 0.085283$), lo cual implica que su variabilidad puede explicarse por factores aleatorios dentro de ciertos límites esperados. Aunque el valor p es bajo, aún se acepta como ajuste válido, indicando que hay otros elementos —como cambios en materiales, tecnología o políticas— que influyen en los costos.

Este hallazgo tiene implicaciones importantes en términos de control financiero y optimización de inversiones en infraestructura energética, particularmente en proyectos de integración de energías renovables que requieren altos niveles de inversión inicial, (Paranthaman, et al.2024). Estrategias basadas en IA pueden ayudar a predecir tendencias de costo y optimizar el uso de recursos, contribuyendo a la sostenibilidad económica de los proyectos (Jannesar,et al. 2020).

5. Eficiencia de Integración (%)

La eficiencia del sistema también presenta una distribución normal ($p\text{-valor} = 0.0$), lo cual es común en sistemas complejos influenciados por múltiples variables. El valor p nulo sugiere que, aunque la tendencia general es normal, existen factores adicionales que afectan la eficiencia y que merecen un análisis más detallado.

Este resultado refleja la complejidad inherente a los sistemas eléctricos modernos, donde la interacción entre la generación convencional y las fuentes renovables introduce incertidumbre en el desempeño del sistema. Mejorar esta eficiencia requiere soluciones innovadoras como el uso de almacenamiento de energía, digitalización de procesos y modelos predictivos basados en inteligencia artificial (Hassan., 2024).

Conclusión

La transición hacia un sistema energético basado en fuentes renovables es una prioridad global para combatir el cambio climático, reducir las emisiones de carbono y garantizar la seguridad energética. Sin embargo, esta integración enfrenta múltiples desafíos técnicos, económicos y regulatorios que requieren soluciones innovadoras, políticas bien diseñadas y una infraestructura modernizada. A continuación, se presenta una conclusión detallada basada en el análisis del contenido disponible.

1. Desafíos Principales de las Energías Renovables en los Mercados Eléctricos

a) Variabilidad e intermitencia de la generación renovable:

Las fuentes como la solar y la eólica dependen de condiciones climáticas variables, lo que genera incertidumbre en la disponibilidad de energía. Esto dificulta su integración en redes eléctricas tradicionales, diseñadas para fuentes de generación controlables y estables.

b) Infraestructura obsoleta y falta de flexibilidad:

Muchas redes eléctricas actuales no están preparadas para manejar la volatilidad de las renovables ni para operar con sistemas descentralizados. La falta de modernización limita la capacidad de respuesta ante cambios repentinos en la oferta o la demanda.

c) Limitaciones en el diseño de los mercados eléctricos:

Los modelos tradicionales de precios y operación no reflejan adecuadamente la naturaleza intermitente de las renovables, lo cual puede generar inestabilidades, costos elevados y menor competitividad frente a fuentes convencionales.

d) Altos costos de integración y almacenamiento:

Aunque los costos de generación de renovables han disminuido, la inversión en infraestructura de conexión, sistemas de almacenamiento y digitalización sigue siendo alta, especialmente en países en desarrollo.



Implicaciones y Recomendaciones

1. Planificación de Expansión

Dado el crecimiento lognormal de la capacidad instalada, se recomienda mantener un enfoque estratégico y proactivo en la expansión del sistema. Es fundamental monitorear constantemente la capacidad de infraestructura, ya que podría convertirse en un factor limitante a medida que avanza la expansión.

2. Gestión de la Demanda

Los patrones de consumo son estables y predecibles, pero con picos claros asociados al ciclo diurno. Se sugiere implementar estrategias de gestión de la demanda orientadas a reducir cargas en horas punta, así como mejorar la flexibilidad del sistema ante cambios repentinos en el consumo.

3. Optimización de la Infraestructura

La distribución uniforme de la capacidad de infraestructura refleja una planificación adecuada. Para mantener este equilibrio, se recomienda continuar priorizando la relación entre capacidad disponible y demanda real, asegurando que los nuevos proyectos respondan a necesidades geográficas y operativas específicas.

4. Control de Costos

Aunque los costos muestran una distribución normal, su variabilidad debe ser monitoreada cuidadosamente. Se propone establecer mecanismos de control basados en rangos de costo esperados, así como evaluar el impacto de factores externos como políticas regulatorias, fluctuaciones en precios de materiales y tecnologías emergentes.

5. Mejora de la Eficiencia

La eficiencia del sistema varía dentro de un rango normal, pero hay margen para optimizarla. Se recomienda identificar los principales factores que inciden en su desempeño —por ejemplo, condiciones climáticas extremas o fallas en la integración tecnológica— y desarrollar estrategias focalizadas para minimizar su impacto negativo.



REFERENCIAS

Aykut, E., & Alshuraida, I. (2024). Grid integration strategies for optimizing renewable energy deployment and grid resilience. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 12(3), 247–254. <https://doi.org/10.17694/bajece.1529149>

Branding, E. (2025). Challenges of renewable energy in power markets. Retrieved July 9, 2025, from <https://montel.energy/resources/blog/what-are-the-challenges-of-renewable-energy-in-power-markets>

Challenges faced by renewable energy companies in grid integration of solar and wind farms in the usa | cmc global consulting. (n.d.). Retrieved July 9, 2025, from <https://www.cmc-global.consulting/insights/blog/challenges-faced-by-renewable-energy-companies-in-grid-integration-of-solar-and-wind-farms-in-the-usa>

Chen, J., & Li, L. (2024). Optimization of renewable energy integration in smart grids using AI and data analytics. *IET Conference Proceedings*, 2024(20), 111–116. <https://doi.org/10.1049/icp.2024.4090>

Directory, S. (2025). Grid integration challenges – energy → sustainability directory. Retrieved July 9, 2025, from <https://energy.sustainability-directory.com/term/grid-integration-challenges/>

Ethirajan, V., & Mangaiyarkarasi, S. P. (2025). An in-depth survey of latest progress in smart grids: Paving the way for a sustainable future through renewable energy resources. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 12(1), 9. <https://doi.org/10.1186/s43067-025-00195-z>

Hassan, A. A., & Atia, D. M. (2024). Optimizing microgrid integration of renewable energy for sustainable solutions in off/on-grid communities. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 11(1), 61. <https://doi.org/10.1186/s43067-024-00186-6>

Jannesar, M. R., Sedighi, A., Savaghebi, M., Anvari-Moghadam, A., & Guerrero, J. M. (2020). Optimal multi-objective integration of photovoltaic, wind turbine, and battery energy storage in distribution networks. *Journal of Energy Management and Technology*, 4(4). <https://doi.org/10.22109/jemt.2020.217725.1227>

Kazan State Energy University, Kazan, Russian Federation, & Vassunova, Y. Yu. (2024). Smart grids optimization with renewable energy sources integration. *EKONOMIKA I UPRAVLENIE: PROBLEMY, RESHENIYA*, 9/6(150), 146–156. <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2024.09.06.017>

Lee, S. (2025). Renewable energy grid integration: Challenges and solutions. Retrieved July 9, 2025, from <https://www.numberanalytics.com/blog/renewable-energy-grid-integration-challenges-solutions>

Paranthaman, V., Mothilal, T., Natrayan, L., & Irfan, M. (2024). Optimizing renewable energy integration: A novel pso-adp control scheme for enhanced energy storage system performance. 2024 14th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering (Confluence), 154–159. <https://doi.org/10.1109/Confluence60223.2024.10463352>

Quizhpe, K., Arévalo, P., Ochoa-Correa, D., & Villa-Ávila, E. (2024). Optimizing microgrid planning for renewable integration in power systems: A comprehensive review. *Electronics*, 13(18), 3620. <https://doi.org/10.3390/electronics13183620>



Rajaperumal, T. A., & Columbus, C. C. (2025). Transforming the electrical grid: The role of AI in advancing smart, sustainable, and secure energy systems. *Energy Informatics*, 8(1), 51. <https://doi.org/10.1186/s42162-024-00461-w>

Renewable energy and grid stability: Modern infrastructure challenges and solutions. (2025). PVcase. Retrieved July 9, 2025, from <https://pvcase.com/blog/renewable-energy-and-grid-stability-modern-infrastructure-challenges-and-solutions>

Xinlei, wang. (2023, May 3). Using renewables in energy grids—challenges & solutions. Patsnap. <https://www.patsnap.com/resources/blog/integrating-renewables-into-the-existing-energy-grid-challenges-and-solutions/>

Zhang, H., Tang, Q., Xu, D., & Wang, J. (2023). Integrated energy system multi-horizon investment optimization considering grid and renewable constraints. 2023 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia), 718–725. <https://doi.org/10.1109/ICPSAsia58343.2023.10295035>

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés posible.

Financiamiento:

No existió asistencia financiera de partes externas al presente artículo.

Agradecimiento:

N/A

Nota:

El artículo no es producto de una publicación anterior.