

**Evaluación de la confiabilidad de la generación del sistema eléctrico colombiano, bajo  
diferentes escenarios de participación de energía solar, eólica e hidráulica.**

María Trinidad Estupiñán Méndez

José Miguel Salazar Dávila

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniería Industrial

Directora:

María Camila Ochoa Jaramillo

Universidad EIA

Ingeniería Industrial

Envigado

11/2024

## Contenido

Resumen .....	5
Abstract .....	6
1. Introducción .....	7
2. Antecedentes .....	8
3. Objetivos .....	16
4.1 Objetivo general .....	16
4.2 Objetivos específicos.....	16
4. Marco teórico .....	16
5. Metodología .....	29
6. Desarrollo del modelo.....	32
6.1 Preparación y Exploración de Datos: .....	33
6.2 Preprocesamiento de Datos: .....	37
6.3 Simulación para la evaluación de confiabilidad.....	38
6.4 Definición del Modelo de Optimización: .....	41
6.4.1 Restricciones del Modelo .....	42
6.5 Análisis de Resultados: .....	44
7. Conclusiones y recomendaciones .....	51
8. Referencias.....	53
9. Anexos .....	58

## **Lista de tablas**

**Tabla 1** Número de proyectos vigentes por rango de potencia

**Tabla 2** Capacidad de proyectos vigentes por tipo y capacidad por proyecto de proyecto (MW)

**Tabla 3** Capacidad de proyectos vigentes por tipo y capacidad por proyecto de proyecto (MW).

## **Lista de figuras**

**Figura 1** *De Demanda de energía en Colombia (GWh) de octubre 2021 a octubre 2024*

**Figura 2** *Generación de energía hidráulica y fósil Colombia (GWh) de octubre 2022 a octubre 2023.*

**Figura 3** *Generación energía Solar (GWh) de octubre 2021 a octubre 2023.*

**Figura 4** *Esquema institucional del mercado eléctrico colombiano.*

**Figura 5** *Generación total por combustible 2021.*

**Figura 6** *Proyección de demanda energía eléctrica (GWh-año) – sin GCE Colombia*

**Figura 7** *Número de proyectos vigentes por fase y fuente de generación.*

**Figura 8** *Potencia instalada de proyectos vigentes por fase y fuente de generación.*

**Figura 9** *Potencia instalada de proyectos vigentes por fase y fuente de generación.*

**Figura 10** *Serie de tiempo y descomposición Demanda energía eléctrica en el SIN.*

**Figura 11** *Serie de tiempo y descomposición Generación Solar*

**Figura 12** *Serie de tiempo y descomposición Generación Eólica*

**Figura 13** *Serie de tiempo y descomposición Aportes hídricos.*

**Figura 14** *Simulación confiabilidad sin termoeléctricas.*

**Figura 15** *Multiplicadores Solares y Eólicos para proyecciones de demanda.*

**Figura 16** *Simulación sistema con multiplicadores generación máxima.*

**Figura 17** *Simulación sistema con multiplicadores generación promedio.*

**Figura 18** *Simulación sistema con multiplicador generación solar 150 y eólica 1.*

**Figura 19** *Simulación sistema con multiplicador generación solar 130 y eólica 1.*

**Figura 20** *Simulaciones sistema con multiplicadores generación solar de 120 multiplicador eólico 1.*

**Figura 21** *Simulaciones sistema con multiplicadores generación solar de 110 multiplicador eólico 1.*

## Resumen

Esta investigación se centra en evaluar la confiabilidad del sistema eléctrico colombiano ante la incorporación de energías renovables, específicamente solar, eólica e hidráulica. El objetivo principal es determinar la capacidad de las centrales hidroeléctricas en Colombia para mitigar la variabilidad inherente de estas fuentes. La metodología incluye un análisis de las características de cada tipo de generación y el desarrollo de un modelo de optimización que permite planificar la inversión y operación de un sistema de generación solar/eólica complementado con hidroeléctrica de embalse. Además, se evalúa la confiabilidad del sistema bajo distintos escenarios de demanda y proporciones de energías renovables.

Los resultados permiten evaluar la confiabilidad del sistema y proyectar los esfuerzos necesarios para la expansión de la capacidad energética, teniendo en cuenta el aumento en la demanda. Asimismo, el análisis identifica las direcciones más rentables en términos de costo-beneficio para una expansión eficiente y exitosa, considerando las características y dinámicas naturales de cada fuente de generación.

**Palabras clave:** problema de expansión de la capacidad de generación, confiabilidad, energías renovables, optimización, sistema interconectado nacional.

### **Abstract**

This research focuses on assessing the reliability of Colombia's electric system considering the integration of renewable energy sources, specifically solar, wind, and hydroelectric power. The main objective is to determine the capacity of Colombia's hydroelectric plants to mitigate the inherent variability of these sources. The methodology includes an analysis of the characteristics of each generation type, alongside the development of an optimization model that facilitates investment and operational planning for a combined solar/wind and hydroelectric reservoir-based generation system. Additionally, the reliability of the system is evaluated across various demand scenarios and renewable energy participation levels.

The results enable an evaluation of system reliability and provide insights into the necessary efforts for energy capacity expansion in response to rising demand. Furthermore, the analysis identifies the most cost-effective directions for efficient and successful expansion, considering the unique characteristics and natural dynamics of each generation source.

**Keywords:** generation expansion problem, reliability, renewable energy, optimization, national interconnected system.

## 1. Introducción.

La producción de energía eléctrica en Colombia depende principalmente de la generación hidroeléctrica, que representa el 70% de la capacidad instalada, es decir, 13.211 MW de un total de 18.671 MW (UPME, 2022a). Sin embargo, el país se encuentra en un proceso de transición energética en el que busca diversificar su matriz incorporando energías renovables no convencionales, como la solar y la eólica. Según el Plan Energético Nacional 2021-2050, la meta es que las energías renovables representen un 14% de la generación eléctrica en 2022, con aumentos progresivos hasta alcanzar un 35% para el año 2050 (UPME, 2021). Esta transición energética es una prioridad nacional, impulsada tanto por la necesidad de reducir la dependencia de los combustibles fósiles como por el objetivo de fomentar la sostenibilidad y la innovación en el sector eléctrico (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

La energía eléctrica es un recurso esencial para el desarrollo económico y social de un país, y Colombia no es la excepción. En 2021, el consumo de energía eléctrica en Colombia fue de 68.462 GWh, lo que representó un aumento del 5,24% con respecto al año anterior (UPME, 2022a).

La transición energética viene siendo una de las prioridades del gobierno colombiano, como se menciona en el documento de *Transición Energética Colombia* (Ministerio de Minas y Energía, 2021). En este sentido, se busca reducir la dependencia de los combustibles fósiles y aumentar la participación de las energías renovables no convencionales en la matriz energética del país. También se pretende mejorar la eficiencia energética y fomentar la innovación en el sector.

A medida que Colombia incorpora más fuentes renovables en su sistema eléctrico, surgen nuevos desafíos relacionados con la confiabilidad y estabilidad del suministro. La variabilidad inherente de la energía solar y eólica, afectada por fenómenos naturales y ciclos estacionales, requiere una planificación cuidadosa y estrategias de optimización que aseguren una operación eficiente del sistema. En este contexto, se hace indispensable no solo mejorar la eficiencia energética, sino también implementar técnicas avanzadas de optimización matemática para tomar decisiones basadas en la gestión integrada de las distintas fuentes de generación.

Este trabajo de investigación explora cómo optimizar la combinación de las fuentes de generación renovable y convencional en Colombia, con el objetivo de reducir la dependencia de las plantas termoeléctricas y maximizar el uso eficiente de los recursos energéticos renovables. A través de un análisis exploratorio inicial de la demanda de energía y de las series temporales de las principales fuentes de generación, se identifican patrones de estacionalidad y tendencias que impactan la confiabilidad del sistema interconectado nacional. Posteriormente, mediante técnicas de optimización, se desarrollan multiplicadores para ajustar la capacidad de generación solar y eólica en función de la demanda proyectada. Este enfoque permite identificar combinaciones óptimas de recursos que minimicen la pérdida de agua en forma de vertimientos y mejoren la adaptación de la generación a la demanda fluctuante.

La aplicación de la optimización matemática en este contexto representa una herramienta de gran valor, ya que facilita la toma de decisiones informadas para la planificación y operación del sistema eléctrico, permitiendo una integración eficiente de las energías renovables y fortaleciendo la sostenibilidad energética del país (Ventura, Meneu Gaya y Pérez-Salamero González (2000)). De esta forma, el presente estudio contribuye al avance de la transición energética en Colombia, proponiendo estrategias concretas que impulsan la diversificación de la matriz energética y promueven un uso más sostenible y confiable de los recursos energéticos.

## **2. Antecedentes**

La evolución de los sistemas energéticos hacia la integración de fuentes renovables ha sido un tema central en la investigación en busca de sistemas más eficientes y sostenibles. La necesidad de evaluar y garantizar la confiabilidad de estos sistemas en entornos cambiantes y con la introducción de energías intermitentes ha sido un desafío esencial. Además, de la necesidad por diversificar las fuentes de energía. En este contexto investigaciones en América Latina han explorado estrategias para una integración eficaz de energías renovables. Un estudio se enfocó en evaluar la viabilidad de integrar la tecnología solar fotovoltaica en hogares colombianos (Granados et al., 2022). Este examen meticuloso consideró variables socioeconómicas y geográficas,



resaltando una reducción significativa en los costos de esta tecnología y abriendo la posibilidad de un modelo energético más sostenible.

El cambio climático, especialmente el aumento de la temperatura global puede afectar la producción de energía hidroeléctrica. Esta es la conclusión de un estudio que analiza los escenarios de calentamiento global de 1.5 °C y 2.0 °C y su impacto en el potencial hidroeléctrico de la zona. El estudio utiliza datos de modelos climáticos y modelos hidrológicos para estimar la incertidumbre asociada a los cambios en la precipitación y la evapotranspiración potencial, que influyen en la generación de energía hidroeléctrica. Los resultados muestran una alta incertidumbre tanto en los parámetros climáticos como hidrológicos, lo que implica un riesgo para la seguridad energética de la región. El estudio recomienda tener en cuenta estos hallazgos en la planificación del agua y la energía, y tomar medidas urgentes para evitar superar el límite de calentamiento global de 1.5 °C, que podría ocurrir en la próxima década. (Nonki et al., 2023).

Existe un celebre problema de optimización llamado el *Generation expansion planning optimisation* (Optimización de la planificación de la expansión de la generación), esta consiste en encontrar el plan óptimo a largo plazo para la construcción de nueva capacidad de generación sujeta a diversas restricciones económicas y técnicas. Estas restricciones se han visto condicionadas por el interés a través de los años y por el desarrollo de nuevas metodologías de optimización. (Oree et al., 2017).

Se han aplicado diversos enfoques para abordar este problema en Brasil por ejemplo investigadores buscaron determinar la combinación óptima de fuentes de energía renovable para satisfacer la creciente demanda energética del país (Schmidt et al., 2016). Esta investigación identificó una solución integral, aprovechando la energía hidroeléctrica, eólica y solar, respaldada por sistemas de almacenamiento. Los resultados indicaron la factibilidad de una generación eléctrica casi completamente renovable, señalando la necesidad de soluciones de almacenamiento más eficientes y la exploración de la generación distribuida. Al igual que esta investigación, numerosos artículos abordan este tema.

Un enfoque destacado en la optimización de la planificación de expansión de generación es la producida Garcia y compañía en el paper *Reliability-Constrained Power System Expansion Planning: A Stochastic Risk-Averse Optimization Approach* incorporación de restricciones de confiabilidad, fundamentales para asegurar un suministro constante y seguro de energía. En este contexto, se ha propuesto el uso de medidas de riesgo como VaR (Value-at-Risk) y CVaR (Conditional Value-at-Risk), comúnmente empleadas en los mercados financieros, para evaluar el riesgo asociado con la expansión del sistema. Estas medidas, junto con índices tradicionales de confiabilidad como el LOLP (Loss of Load Probability) y el EPNS (Expected Power Not Supplied), permiten una evaluación más robusta de la confiabilidad del sistema en distintos escenarios. Para reducir el esfuerzo computacional, algunos estudios han aplicado la técnica de descomposición de Benders, dividiendo el problema de expansión en un subproblema de inversión y dos subproblemas orientados a evaluar los costos operativos y los índices de confiabilidad. Este enfoque ha sido aplicado en el sistema de potencia de Bolivia, donde el subproblema operativo se resolvió mediante Programación Estocástica Dinámica Dual (SDDP) y el subproblema de confiabilidad mediante simulación Monte Carlo. Esta metodología demuestra cómo el uso de técnicas avanzadas de optimización puede mejorar significativamente la planificación de sistemas de potencia bajo restricciones de confiabilidad. (Garcia et al., 2023)

Desde hace varios años, investigadores de todo el mundo han buscado responder a la pregunta de cómo planificar una matriz energética. Dependiendo de las herramientas y enfoques utilizados, se ha logrado avanzar significativamente hasta alcanzar modelos de gran robustez y complejidad. Uno de los factores que influye en la forma de abordar estas preguntas es la composición de los sistemas de generación y suministro eléctrico. Y es que estos sistemas de generación eléctrica en el mundo han venido cambiando significativamente con los años, el desarrollo de nuevos métodos matemáticos, de nuevas tecnologías de generación, o el cambio de los contextos y de las necesidades que como humanidad se van presentando condicionan los enfoques que los planeadores e investigadores del sistema determinan.

Esta evolución se evidencia en los primeros esfuerzos por modelar matemáticamente la expansión de los sistemas eléctricos. A mediados del siglo XX, investigadores como Masse y

Gibrat en Francia comenzaron a aplicar la programación lineal para optimizar la planificación de la generación, estableciendo así un precedente en la búsqueda de soluciones económicas y eficientes. Su trabajo pionero demostró la importancia de considerar tanto los aspectos técnicos como los económicos en la toma de decisiones relacionadas con la expansión de los sistemas eléctricos, un desafío que persiste hasta nuestros días. Los planificadores de sistemas eléctricos se han enfrentado históricamente a la tarea de determinar las soluciones más económicas para satisfacer la demanda creciente de energía, al tiempo que cumplen con las restricciones técnicas y regulatorias. La necesidad de persuadir a las autoridades competentes para obtener la aprobación de inversiones ha impulsado la búsqueda de métodos de análisis y evaluación precisos y fiables. (Massé & Gibrat, 1957)

Con el paso del tiempo y la llega de nuevas tecnologías el *problema de la expansión del sistema de generación eléctrica* (GEP) se ha vuelto más complejo, adicionado a esto la diversidad de actores y naturalezas que conforman un sistema tan interconectado como este. Inicialmente, el objetivo de la planificación de expansión de generación (GEP) era encontrar el esquema más económico para satisfacer la demanda de electricidad proyectada, sujeto a ciertas restricciones. Sin embargo, con el desarrollo de más investigaciones en el tema, se descubrió que los modelos de programación lineal (LP) no son suficientes para manejar la gran cantidad de restricciones y relaciones no lineales presentes en un problema real de GEP.

A medida que el problema se fue volviendo más complejo y se incorporaron más variables, se desarrollaron y aplicaron nuevos métodos de optimización. En el artículo *Modelos para determinar inversiones de menor costo en el suministro de electricidad*, el autor Dennis Anderson (1972) revisa las técnicas que se aplicaban a este problema en ese momento, incluyendo la programación lineal (LP), no lineal (PNL) y la programación dinámica.

La implementación de estos nuevos métodos posibilitó la inclusión de nuevas dinámicas, variables y relaciones en el sistema un ejemplo de esto se ve en el artículo *La inclusión de reservas rotativas' en modelos de inversión y simulación para la generación eléctrica*, donde los autores a treves de la programación dinámica pudieron modelar de manera más precisa las fluctuaciones de

la demanda eléctrica a lo largo del tiempo, incorporando curvas de distribución de carga. Esto permitió obtener resultados más realistas y sensibles a cambios en las condiciones del sistema. La inclusión de variables como las *reservas rotativas* y el modelamiento detallado de las curvas de carga representaron un avance significativo en la capacidad de los modelos para capturar la complejidad de los sistemas eléctricos reales. (Schaeffer & Cherene, 1989) Sin embargo, los desafíos continuaron creciendo a medida que se incorporaban nuevas tecnologías y se intensificaba la necesidad de una mayor sostenibilidad y flexibilidad en los sistemas energéticos.

La introducción de las computadoras desencadenó una revolución en las técnicas de optimización, dando lugar a una amplia gama de métodos heurísticos y metaheurísticos. Estos enfoques, que se caracterizan por buscar soluciones de alta calidad en un tiempo de cómputo razonable, sin garantizar la optimalidad absoluta, han diversificado significativamente el arsenal de herramientas disponibles para resolver problemas complejos. En particular la heurística se diferencia de los métodos exactos ofrecen una vía práctica para encontrar soluciones satisfactorias en escenarios donde la complejidad computacional impide la búsqueda exhaustiva de todas las alternativas. (Melián et al., 2003.). Una de las metodologías que se ha utilizado para resolver el GEP es la metodología de *Simulated Annealing* este es esencialmente un método de búsqueda aleatoria en los que las nuevas soluciones, generadas de acuerdo con una secuencia de distribuciones de probabilidad o un procedimiento aleatorio, pueden aceptarse incluso si no conducen a una mejora en la función objetivo (Astolfi et al., 2017).

En el ámbito de los sistemas de suministro de electricidad, las técnicas de optimización con un alto grado de detalle suelen enfrentar dificultades debido al manejo de grandes volúmenes de datos, altos costos computacionales y limitaciones en la tolerancia a fallos y expansión del sistema. Por esta razón Mori y Tekeda en su investigación *Parallel Simulated Annealing for Power System Decomposition* recurrieron a la optimización descentralizada, que descompone el problema en subproblemas, aliviando las dificultades relativas a las dimensiones y reduciendo el esfuerzo computacional. En este contexto, la técnica de *simulated annealing* es particularmente eficaz, ya que permite evitar mínimos locales y acercarse a una solución cercana al mínimo global. Se han desarrollado variantes como el *Parallel Simulated Annealing* (PSA), que mejora la búsqueda al

considerar múltiples puntos simultáneamente, aumentando la probabilidad de encontrar soluciones más precisas y fiables. El PSA ha mostrado buenos resultados en la reconfiguración de redes y control de voltaje descentralizado, dividiendo las redes en subredes con variables de control balanceadas y mejorando la factibilidad de las soluciones (Mori Koichi Takeda, 1993).

Entre los métodos heurísticos aplicados a la solución del GEP destacan los *Algoritmos Genéticos*, la *Estrategia Evolutiva* y la *Programación Evolutiva*. Estos modelos han experimentado un crecimiento notable debido a su capacidad para abordar problemas complejos de optimización en sistemas eléctricos. En el ámbito de la planificación y expansión de redes de transmisión, especialmente en mercados eléctricos desregulados, se han desarrollado metodologías innovadoras para enfrentar los desafíos técnicos y económicos derivados de la apertura del acceso a las redes de transmisión. Este acceso abierto, promovido para fomentar la competencia entre generadores y optimizar la eficiencia en la producción y distribución de energía, ha captado la atención de organismos reguladores y empresas eléctricas en todo el mundo. En este contexto, varios países han implementado políticas de acceso abierto en sus sistemas de transmisión, permitiendo que múltiples generadores puedan acceder a los consumidores finales, lo cual estimula la competencia y, potencialmente, reduce los costos de la electricidad para los usuarios (Rudnick et al., 1996).

En relación con esta idea, los autores Rudnick y Palma-Bahneke introdujeron el concepto de *Sistema de Transmisión Adaptado Económicamente*, el cual busca optimizar la infraestructura de transmisión desde una perspectiva tanto técnica como económica. La legislación de países como Chile y Perú ha abordado este concepto, definiéndolo como un sistema que permite satisfacer la demanda de energía al menor costo posible, en equilibrio con la oferta y manteniendo la calidad del servicio. Estas definiciones han motivado el desarrollo de modelos y algoritmos que puedan traducir estos conceptos económicos en herramientas prácticas de planificación, adaptándose a las características hidro-térmicas de los sistemas de generación de cada país (Rudnick et al., 1996).

Cada sistema tiene sus propias características, y las aplicaciones de estos métodos son vastas. Una muestra significativa de esto es la investigación *Optimal location of phase shifters in the French network by genetic algorithm*, desarrollada por Pateni, Vitet, Bena y Yokoyama. Con

un enfoque centrado en el funcionamiento estructural del sistema, los autores analizaron cómo los dispositivos FACTS en serie, como los capacitores y los cambiadores de fase, pueden controlar los flujos de energía en una red, reduciendo los flujos en líneas muy cargadas y, en consecuencia, disminuyendo los costos de producción. La ubicación óptima de estos dispositivos es crucial y se puede determinar mediante un algoritmo genético. Este enfoque ha sido aplicado tanto a un caso de prueba con 36 líneas como a la red francesa. Los dispositivos FACTS en serie pueden ser particularmente útiles para controlar los flujos de energía y reducir costos, especialmente en redes malladas. La investigación también exploró el uso de procesamiento paralelo para mejorar la eficiencia de estos algoritmos.

Después de haber hecho una revisión de los diferentes métodos y aplicaciones que a través de la historia se han aplicado es de suma importancia para el propósito de esta investigación poder hacer una revisión de las aplicaciones puntuales en el contexto ambiental.

El sistema eléctrico colombiano se caracteriza por una dependencia notable de la energía hidroeléctrica, lo cual plantea desafíos importantes al considerar el impacto del cambio climático en la generación de este tipo de energía (Arango-Aramburo et al., 2019). Para mitigar los riesgos asociados, se han explorado estrategias de diversificación mediante la incorporación de fuentes eólica y solar, las cuales, aunque ofrecen alternativas viables en la planificación de expansión energética (GEP), introducen complejidades adicionales en la interacción de nuevas variables. Modelos de simulación de adaptación han revelado posibles estrategias para reducir los costos de energía, disminuir emisiones de carbono y fortalecer la economía nacional.

En este contexto, se evaluó la optimización del uso de energías renovables en un sector fuertemente dependiente de la hidroelectricidad (Henao et al., 2019). Este estudio resaltó la importancia de diversificar las fuentes de energía, destacando la viabilidad económica y ambiental a largo plazo de las energías solar y eólica y subrayando la necesidad de un plan de expansión robusto. Asimismo, se propuso un modelo de operación óptima para sistemas combinados de enfriamiento, calefacción y energía, integrando generación renovable y almacenamiento mediante un enfoque de aprendizaje profundo por refuerzo, que optimiza costos operativos y favorece una

transición hacia un sistema energético más sostenible (Ruan et al., 2022). Estas investigaciones subrayan la importancia de explorar soluciones de almacenamiento eficientes, generación distribuida y modelos óptimos de integración de energías renovables.

La evolución hacia una matriz energética más diversificada ha sido impulsada por investigaciones que exploran distintas aproximaciones para la integración de energías renovables. Un estudio clave examinó el comportamiento de prosumidores de energía en mercados locales, destacando el impacto positivo de *los Smart Energy Hubs* (S.E. Hubs) en la eficiencia del mercado al reducir costos operativos (Ebrahimi & Sheikhi, 2023). Otro enfoque innovador abordó la incertidumbre en la integración de energías renovables mediante técnicas de programación con restricciones de equilibrio, empleando un algoritmo de *Valor en Riesgo Condicional* (CVaR) para manejar la intermitencia de estas fuentes de energía (Heidari et al., 2022).

Para la gestión de energía residencial, se propuso un enfoque basado en reglas denominado CANO, que busca reducir emisiones de gases de efecto invernadero y satisfacer de manera eficiente la demanda energética residencial sin grandes requerimientos computacionales (Ortiz et al., 2022). Además, se han explorado modelos de control colaborativo en sistemas energéticos integrados mediante *algoritmos de aprendizaje profundo de refuerzo multiagente*, optimizando el control en sistemas complejos y mejorando tanto la eficiencia como la adaptabilidad (Jing et al., 2022).

Sobre todo, esto es relevante analizar como la gestión integral de sistemas de energía renovable es esencial para asegurar un suministro energético sostenible. Sobre esto el estudio *Optimización ponderada basada en la exergía y toma de decisiones inteligente para sistemas de energía renovable* propone un enfoque multifactorial que equilibra economía, confiabilidad, riesgo y consideraciones ambientales en el diseño y operación de estos sistemas (Tariq et al., 2022). Además, el estudio *Un enfoque de programación matemática para el funcionamiento óptimo de sistemas de almacenamiento y generación renovable* enfatiza la importancia de coordinar sistemas de almacenamiento con fuentes renovables y generación convencional en redes modernas, buscando reducir pérdidas y optimizar los perfiles de voltaje en el sistema eléctrico, aspectos esenciales para una gestión energética eficiente (Mundotiya et al., 2022).

### **3. Objetivos**

#### **4.1 Objetivo general**

Evaluar la capacidad de la hidroeléctrica en Colombia para balancear la intermitencia de las nuevas fuentes de energía renovable.

#### **4.2 Objetivos específicos**

- Estudiar las características de la generación solar, eólica e hidroeléctrica.
- Desarrollar un modelo para optimizar la inversión y la operación de un sistema con generación solar/eólica e hidroeléctrica con embalse.
- Evaluar la confiabilidad de la generación del sistema eléctrico bajo diferentes escenarios de demanda y de participación de energía solar, eólica e hidráulica.

### **4. Marco teórico**

Colombia enfrenta desafíos en su sistema eléctrico debido a la dependencia de energía hidráulica y la estacionalidad de su recurso hídrico. Lograr una descentralización del suministro de energía eléctrica es fundamental para la confiabilidad del sistema eléctrico colombiano. Adosado a esto, la relación impacto medio ambiental, generación energética, es de suma importancia, procurando generar una transición amigable con el medio ambiente.

A lo largo de la historia, la energía ha desempeñado un papel fundamental en el progreso de la humanidad. Desde los albores de su existencia, el ser humano ha dependido de la energía para garantizar su supervivencia y facilitar su evolución. La energía, en su esencia, se refiere a la capacidad de los cuerpos para realizar un trabajo y generar transformaciones, lo que significa que cualquier acción que implique un cambio en un objeto, ya sea en sí mismo o en otros, requiere la aportación de energía para ejecutarlo (Arias, 2006).



La energía presente en un objeto es única, pero se manifiesta de diversas maneras en la naturaleza, y estas formas pueden transformarse en otros tipos de energía. Un ejemplo de ello es la energía potencial, que usualmente está vinculada a la altura de un cuerpo con respecto al suelo, la energía cinética, que surge del movimiento de los objetos, y la energía mecánica, que se obtiene al combinar estas dos formas mencionadas anteriormente. Además, existen otras formas de energía, como la energía sonora, nuclear, térmica y eléctrica, siendo esta última la derivada de la corriente eléctrica (Michinel & Martínez, 1994).

La energía eléctrica es la forma de energía más utilizada, debido a su relevancia en las actividades cotidianas del ser humano, como la comunicación, la iluminación y el transporte. Esta forma de energía se origina a partir de una diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, lo que posibilita establecer una corriente eléctrica entre ellos, permitiendo así la obtención de trabajo. La corriente eléctrica es el resultado de la circulación de una cantidad de carga eléctrica a través de un conductor y se convierte en un fenómeno físico fundamental en la generación y transmisión de energía eléctrica para una variedad de aplicaciones en la vida moderna (Balcells, Autonell & Barra, 2010).

La energía eléctrica se genera en centrales eléctricas a partir de diversas fuentes de energía primaria, como la hidráulica, térmica, solar, nuclear, eólica y otras, siendo las principales las plantas hidroeléctricas, térmicas, geotérmicas, solares, eólicas y nucleares. Esta electricidad es transportada a través de redes eléctricas hasta áreas urbanas e industriales, donde se transforma en energía secundaria, como luz, calor, sonido y movimiento, para su uso en distintas aplicaciones (Ramos-Gutiérrez & Montenegro-Fragoso, 2012).

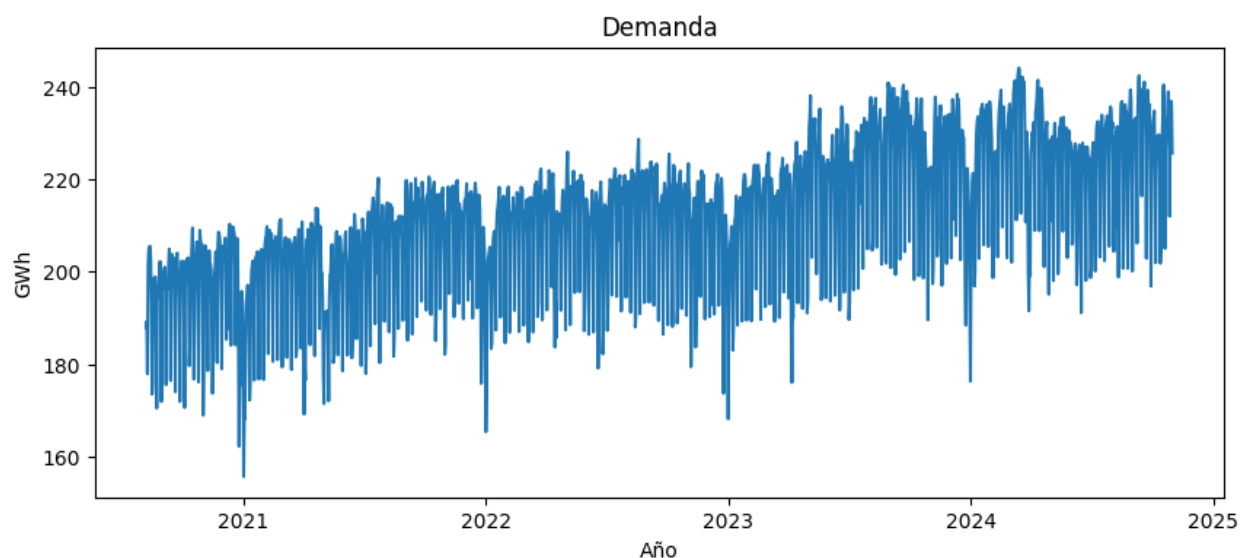
Las centrales hidroeléctricas aprovechan los recursos fluviales para producir energía, enfocándose en la conversión de la energía potencial del agua en energía mecánica y, posteriormente, en energía eléctrica. Esta forma de generación de energía se distingue por su dependencia en fuentes de combustible, ya que se basa en una fuente de energía renovable proporcionada de manera constante y gratuita por la naturaleza como lo es el agua. Además, presenta ventajas notables, ya que es una opción limpia que no emite contaminantes al aire ni al

agua, lo que contribuye a la preservación del medio ambiente y a la sostenibilidad de las fuentes de energías (Vargas, Alarcón & Fajardo, 2011).

En un sistema de suministro de electricidad la cantidad de variables es considerable, y para que la electricidad llegue a la casa de los pobladores de una región se requiere de un sistema que pueda lidiar con todas estas variables y sus dinámicas para poder suplir la necesidad de electricidad de los pobladores. Un ejemplo de las dinámicas de estas variables es el comportamiento de la demanda. En la Figura 1 se puede observar la evolución de la demanda de energía del Sistema Interconectado Nacional (SIN). Su comportamiento es altamente volátil teniendo en cuenta una desviación promedio de la media de 14,1 GWh, lo que en términos prácticos fue 74.1 veces la generación de la central hidroeléctrica Porce 2 en septiembre. Para suplir esta demanda es fundamental tener un sistema flexible que permita adaptar la generación y suministro de energía a la tan volátil demanda del sistema.

### Figura 1

*Demanda de energía en Colombia (GWh) de octubre 2021 a octubre 2024*

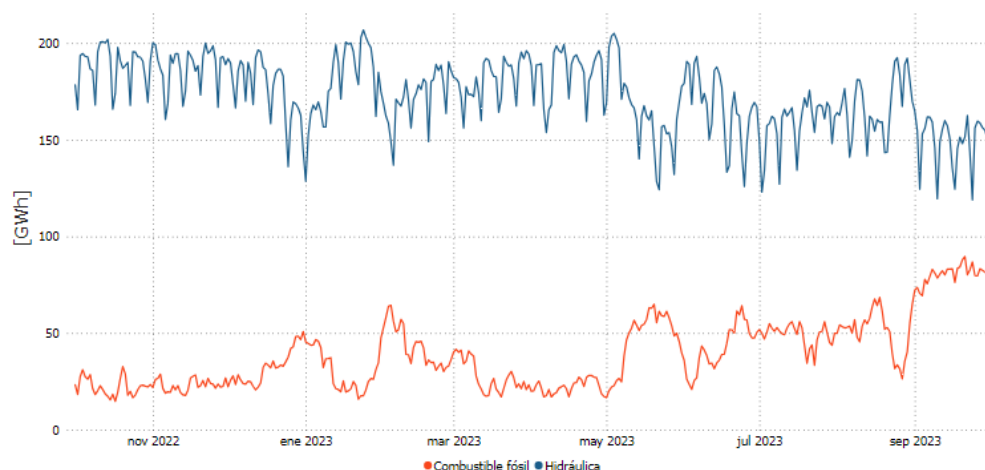


*Datos XM. Creación propia (2024).*

La otra variable que se debe considerar es la generación de electricidad: cómo generarla y dónde hacerlo son preguntas de alta complejidad. En Colombia la energía proviene en promedio un 63,7% de recursos hídricos, mientras que el 31,5% viene de recursos térmicos como gas, carbón, fueloil y combustóleo, la generación restante proviene de otras fuentes de generación. La proporción de las fuentes varía en Colombia según la disponibilidad misma de los recursos, especialmente hídricos, como se puede observar en la Figura 2 y se puede observar cómo estas fuentes se complementan: cuando la generación de una fuente disminuye, la otra aumenta. La forma en que estas fuentes de energía se complementan proporciona flexibilidad al sistema, algo que, en Colombia, como se puede ver en la serie de tiempo, es facilitado por las fuentes de generación fósil.

## Figura 2

*Generación de energía hidráulica y fósil Colombia (GWh) de octubre 2022 a octubre 2023.*

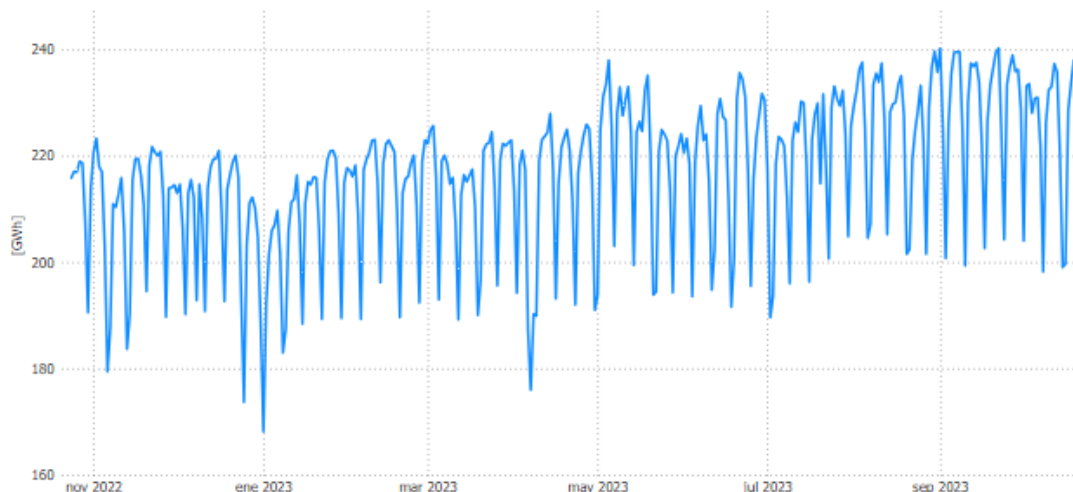


*Datos XM. Creación propia (2023).*

Por el lado de las energías renovables se puede observar en la Figura 3, la generación de las energías renovables muestra un comportamiento diferente, teniendo en cuenta la naturaleza del recurso mismo y el nulo control sobre su generación. El comportamiento de esta fuente se caracteriza por su volatilidad y por responder usualmente a factores climáticos. En Colombia el aporte de las fuentes renovables es muy pequeño a comparación de las fuentes de generación hidráulica y fósil.

### Figura 3

*Generación energía Solar (GWh) de octubre 2021 a octubre 2023.*



*Datos XM. Creación propia (2023).*

Integrar el comportamiento de la generación con el comportamiento de la demanda es un desafío monumental pero esencial. En Colombia el sistema abarca diversas facetas, incluyendo dirección, planificación, regulación, asesoramiento, control, supervisión, operación y administración del mercado, todas fundamentales para asegurar el eficaz funcionamiento del sistema energético. En la figura 4 se puede observar un diagrama de la composición del sistema y sus dinámicas.

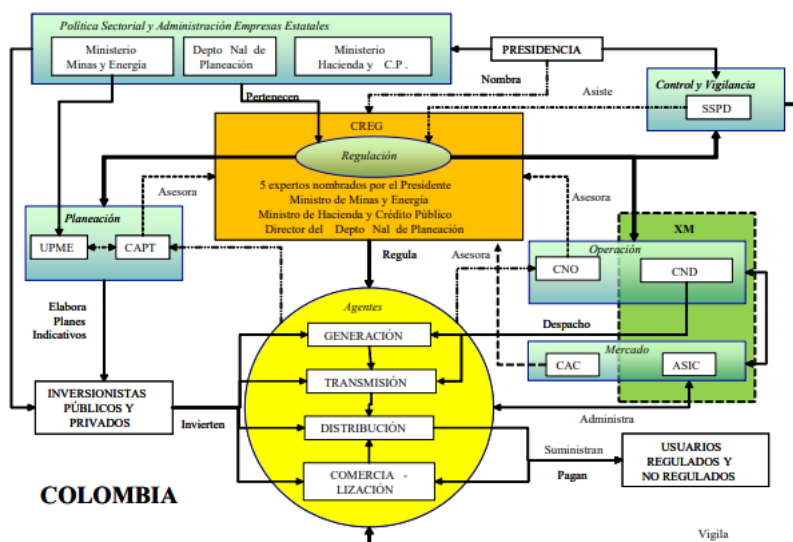
En cuanto a la dirección del sistema, encontramos actores cruciales como el Ministerio de Minas y Energía, el Departamento de Planeación y el Ministerio de Hacienda. Estas tres entidades gubernamentales están encargadas de liderar desde la formación de políticas. Además, estos departamentos y ministerios influyen en el trabajo de la CREG (Comisión de Regulación de Energía y Gas), la cual desempeña un papel crucial en la regulación y en la definición de las reglas que rigen el funcionamiento del sistema, proporcionando así un marco en el que otros actores del sistema pueden desempeñar sus roles específicos. La SSPD (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios) se encarga de supervisar y controlar la labor de la CREG.

Respaldando la dirección y la regulación se encuentra el componente de planificación, que está a cargo de la UPME (Unidad de Planeación Minero-Energética) y el CAPT (Comité Asesor de Planeamiento de la Transmisión). Estas entidades organizan los compromisos establecidos por los gobernantes en los planes de desarrollo a través de planes indicativos de desarrollo. Además, se establece un vínculo con otro grupo de actores fundamentales: los inversionistas, tanto públicos como privados. Estos inversionistas financian plantas de generación, líneas de transmisión, distribución y comercialización de energía. Las dos últimas categorías son las responsables de suministrar y vender energía a los usuarios finales respectivamente, tanto regulados como no regulados.

Para garantizar la operación eficiente del sistema, entran en juego el CON (Consejo Nacional de Operación del Sector Eléctrico) y el CND (Centro Nacional de Despacho). Por otro lado, en el ámbito del mercado, el CAC (Comité Asesor de Comercialización del Sector Eléctrico) y el ASIC (Administrador del Sistema de Intercambios Comerciales) juegan un papel crucial. Estos dos actores mantienen una comunicación constante para asegurar el correcto funcionamiento del sistema en su totalidad.

**Figura4**

*Esquema institucional del mercado eléctrico colombiano.*



CREG (s.f).

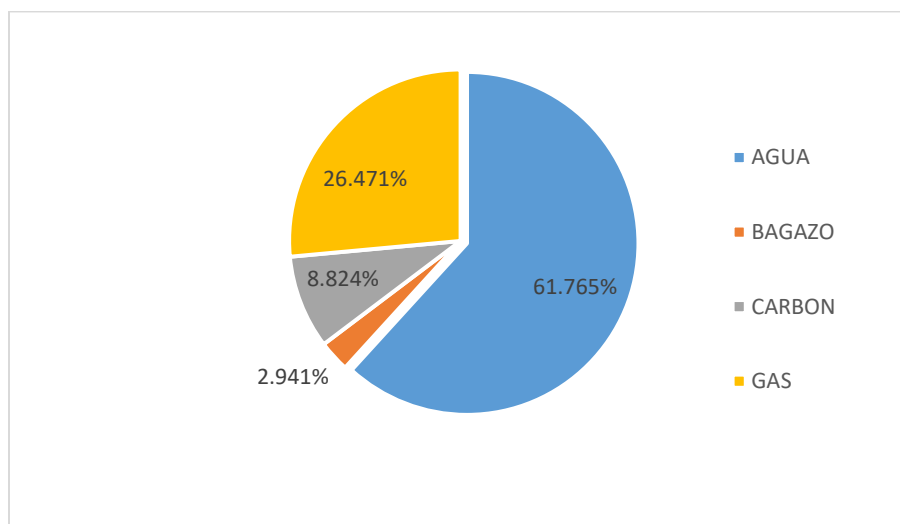
Este sistema requiere funcionar de forma muy compenetrada e inteligente, por los retos que significa integrar los distintos comportamientos de demanda, y generación especialmente. Además, se requiere que el sistema pueda asegurar la confiabilidad pudiendo suministrar constantemente la energía.

Como se evidencia en la Figura 5, la matriz energética de Colombia se caracteriza por su marcada renovabilidad y limpieza. Sin embargo, contar con una capacidad instalada con determinadas características no garantiza necesariamente que la generación efectiva de esa matriz sea igualmente sostenible.

Los desafíos asociados a la generación de energía son significativos, y responder preguntas clave, como la cantidad generada por una fuente específica, la infraestructura necesaria para evitar escasez en periodos de falta de combustibles, cómo operar el sistema de manera óptima desde una perspectiva económica, entre otras, no constituye un desafío trivial.

### Figura 5

*Generación total por combustible 2021.*

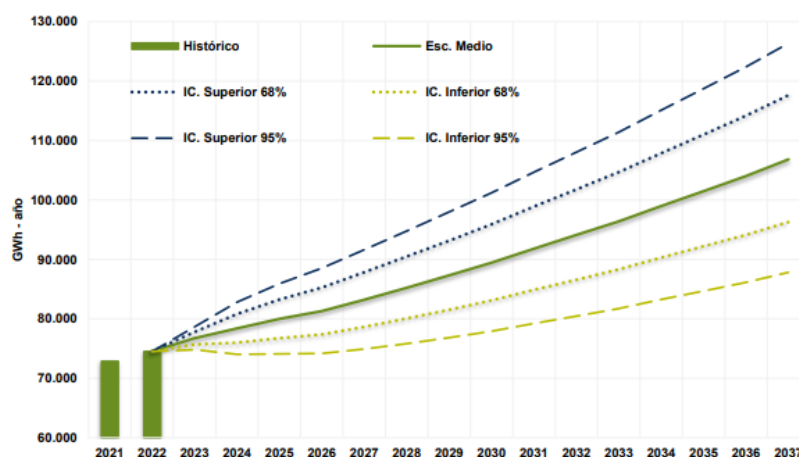


*Datos XM. Creación propia (2023).*

Como se puede observar en la Figura 6 la demanda de energía es creciente, y con este crecimiento la oferta debe crecer con igual o mayor velocidad asegurando la prestación eficiente a todos los habitantes del territorio nacional, siendo esta una responsabilidad constitucional del estado (Constitución Política de Colombia de 1991, Título XII, Capítulo 5, artículo 365).

## Figura 6

*Proyección de demanda energía eléctrica (GWh-año) – sin GCE Colombia*



*Tomado de: Proyección de la demanda de energía eléctrica y potencia máxima 2023-2037 UPME. CREG (2023).*

Para octubre de 2023 en Colombia habían alrededor de 307 proyectos vigentes registrados, en la Tabla 1 se puede observar su caracterización por capacidad instalada y fuente de generación. Es importante resaltar que el registro de proyectos de generación tiene carácter voluntario, por lo que pueden existir proyectos de los que aún la UPME no tenga conocimiento.

**Tabla 1**

*Número de proyectos vigentes por rango de potencia*

▲ Rango	BIOMASA	EÓLICO	GEOTÉRMICO	HIDRÁULICO	SOLAR	TÉRMICO	Total
0 - 1 MW				1	4		5
1 - 10 MW	3	2	1	22	98		126
10 - 20 MW				14	38		52
20 - 50 MW	1	5		4	15		25
50 - 100 MW		6		3	39	5	53
Mayor a 100 MW		17		3	24	2	46
Total	4	30	1	47	218	7	307

*Fuente:* (UPME, 2023).

En dicha tabla se pueden ver todos los proyectos, pero es importante ver qué tan real es la entrada de estos proyectos al sistema interconectado nacional, para esto cada uno de ellos esta categorizado por 3 fases (Sercolombia - Asociación energías renovables) :

- Fase 1 - Prefactibilidad: El proyecto está en una etapa de análisis técnico-económico de sus opciones de inversión para determinar su viabilidad. Este proceso implica verificar su prioridad, realizar un diagnóstico del sector, evaluar su viabilidad técnica y económica, identificar obstáculos, proponer fuentes de financiamiento y finalmente, seleccionar la mejor alternativa en base a los resultados del estudio.
- Fase 2 – Factibilidad: El proyecto se halla en la fase de perfeccionamiento de la alternativa elegida, donde se estudian las condiciones del proyecto. Se desarrolla un diseño de ingeniería a nivel de anteproyecto con dimensiones básicas y estimación de costos, se realiza un análisis de viabilidad económica, formulación inicial del proyecto, estudio financiero y ambiental. Todo esto facilita la decisión de proceder o no con la inversión para ejecutar el proyecto.
- Fase 3 – Ingeniería de detalle: El proyecto tiene definida su ejecución desde el punto de vista técnico y económico. Se cuenta con un diseño detallado de acciones para garantizar su realización y operatividad. Esto incluye planos precisos, especificaciones

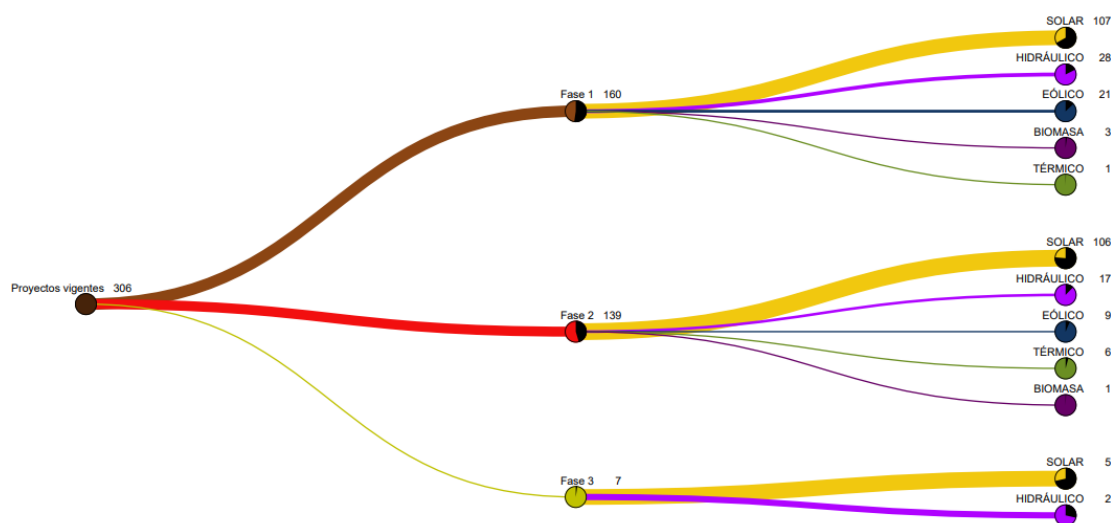


técnicas para construcción, montaje y puesta en marcha, un cronograma de ejecución y un presupuesto detallado de la inversión necesaria.

Entendiendo esto, el estado de los proyectos anteriormente mencionados es el presente en la Figura 7, en esta misma se ve la fuente de generación de los proyectos.

### Figura 7

*Número de proyectos vigentes por fase y fuente de generación.*

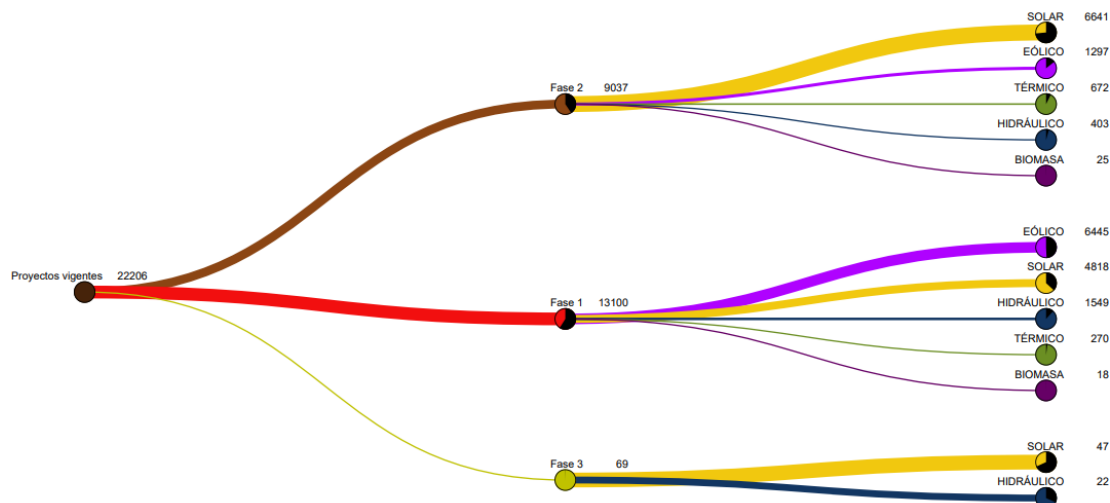


*Tomado de: Informe de Registro de Proyectos de Generación octubre 2023. UPME (2023).*

Por otro lado, en la Figura 8 se puede ver la capacidad de proyectos vigentes por fase (MW).

**Figura 8**

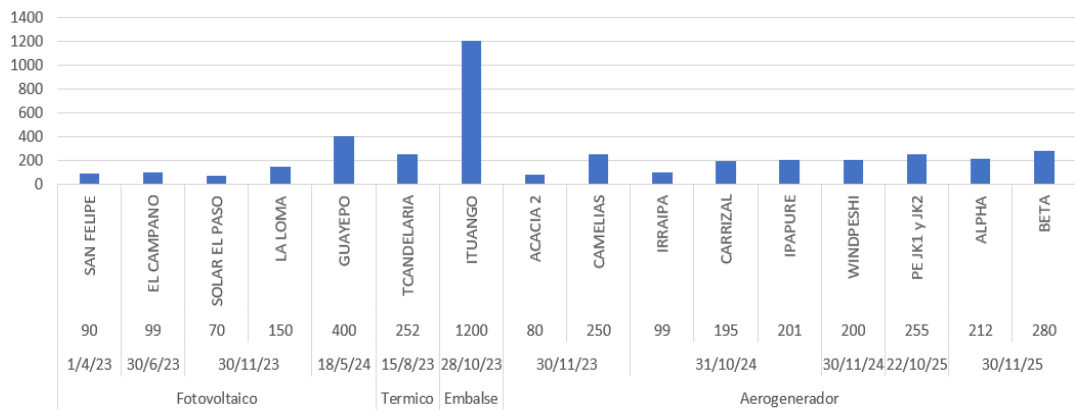
*Potencia instalada de proyectos vigentes por fase y fuente de generación.*



*Tomado de: Informe de Registro de Proyectos de Generación octubre 2023. UPME (2023).*

Dentro del informe de avance proyectos de generación de septiembre 2023 se pueden ver algunos proyectos, sus capacidades de generación y fecha de entrada en operación, siendo estos algunos de los más relevantes en términos de aportes al sistema antes del 2025, Figura 9. En este se pueden ver proyectos como Hidroituango, central hidroeléctrica con una capacidad instalada superior a los 1.200 MW, adicionalmente se observan algunas apuestas en energía solar a corto plazo, y algunos proyectos de generación eólica.

**Figura 9**  
*Potencia instalada de proyectos vigentes por fase y fuente de generación.*



*Informe de avance proyectos de generación – septiembre 2023 UPME. Generación propia (2023).*

Ver dentro de los registros de los proyectos como el 69% de los mismos son de generación solar, como el 16% son de generación hidráulica, habla de una convicción fuerte por comenzar una transición energética, para ratificar esto en las Tablas 2 y 3 se puede observar en términos de potencia (MW) que tan real está la entrada de esa capacidad instalada y el tipo de proyectos que pretenden entrar al sistema.

**Tabla 2**  
*Capacidad de proyectos vigentes por tipo y capacidad por proyecto de proyecto (MW).*

Estado	BIOMASA	EÓLICO	HIDRÁULICO	SOLAR	TÉRMICO	Total
Fase 3			22	149		171
Fase 2	25	1.597	295	6.966	672	9.555
Fase 1	18	6.348	1.549	4.470	270	12.654
Total	43	7.945	1.866	11.585	942	22.381

Fuente: (UPME, 2023).

**Tabla 3**

*Capacidad de proyectos vigentes por tipo y capacidad por proyecto de proyecto (MW).*

▲ Rango	BIOMASA	EÓLICO	HIDRÁULICO	SOLAR	TÉRMICO	Total
0 - 1 MW			1	1		2
1 - 10 MW	18	13	121	707		859
10 - 20 MW			292	827		1.119
20 - 50 MW	25	250	105	606		986
50 - 100 MW		444	165	3.377	402	4.388
Mayor a 100 MW		7.238	1.183	6.066	540	15.027
Total	43	7.945	1.866	11.585	942	22.381

*Fuente: (UPME, 2023).*

El gobierno nacional a través de la ley 1715 de 2014 busca impulsar el uso de fuentes de energía no convencionales, especialmente las renovables, en el sistema energético nacional, la tendencia creciente en energías de fuentes no convencionales avala la efectividad avalan esta decisión de transición, es fundamental que esta transición se haga de forma inteligente, asegurando al confiabilidad y flexibilidad del sistema, despendiendo de las energías de fuente fósil.

La matemática a través de los años ha desarrollado una gran variedad de herramientas se han vuelto cruciales para la resolución de problemas, teniendo campos de aplicación muy bastos y diversos (Draganov, 2022). A la hora de emprender una transición energética es importante que se haga de forma inteligente, y dentro de la matemática se cuentan con muchas variedades de posibles métodos que puedan ser utilizados para la toma de decisiones, encausando una transición que asegure el suministro económico e ininterrumpido de energía eléctrica para todos los colombianos.

Teniendo en cuenta los datos obtenidos a través del portal Sinergox de XM, Colombia enfrenta desafíos en su sistema eléctrico debido a la dependencia de energía hidráulica y la estacionalidad de su rendimiento. La integración efectiva de energías renovables y almacenamiento puede mejorar la seguridad energética y reducir la dependencia de combustibles fósiles (Oswald Úrsula, 2017). Además, esta investigación impulsa el desarrollo de conocimientos y herramientas de optimización matemática, siendo un referente para otros países en transición hacia sistemas energéticos sostenibles.

Asimismo, la investigación contribuye a mejorar la competitividad a largo plazo, optimizando los costos de generación y almacenamiento, reduciendo la dependencia de combustibles y promoviendo la autogeneración de energía renovable. Esto se traduce en ahorros económicos para los consumidores finales.

## 5. Metodología

Este plan de investigación se enfoca en analizar el sistema de suministro eléctrico colombiano y explorar la capacidad de la hidroeléctrica para mitigar la variabilidad inherente de las energías renovables emergentes. A través de un enfoque estructurado, se busca comprender cómo las interacciones entre estas fuentes pueden garantizar un suministro confiable y estable. El plan metodológico detalla una serie de pasos y actividades diseñados para estudiar las características de las diferentes fuentes de energía, desarrollar modelos de integración y evaluar la confiabilidad del sistema eléctrico en distintos escenarios.

Para el desarrollo se inició con el análisis estructurado de las metodologías más apropiadas para abordar nuestro problema. Uno de los métodos más utilizados es la optimización matemática. Eokste es el proceso de encontrar la mejor solución o conjunto de soluciones en un problema dado, ya sea minimizando costos, maximizando beneficios o alcanzando otros objetivos específicos (Edwin K. P. Chong, 2013) su aplicación dentro de los mercados eléctricos es amplia y por su precisión y has sido enfoque crucial para garantizar un suministro eficiente y confiable de energía.

La optimización matemática es una herramienta poderosa que facilita la resolución de problemas complejos en diversos campos, entre ellos los mercados eléctricos. Su objetivo es encontrar las soluciones más efectivas para un problema específico, considerando criterios como costos, beneficios o cualquier otra meta relevante (Chong & Zak, 2013). En el contexto de los sistemas eléctricos, la optimización permite mejorar tanto la planificación como la operación de la generación y distribución de energía, garantizando eficiencia y confiabilidad. Dentro de la optimización de cuenta con una variedad de modelos, técnicas y algoritmos que se utilizan para

encontrar soluciones óptimas o cercanas a óptimas en problemas de optimización (Nocedal & Wright, 2006).

En términos generales sobre el GEP se han aplicado una gran cantidad de métodos matemáticos, con el pasar de los años nuevas metodologías han sido desarrolladas y aprovechadas en pro de buscar problemas cada vez más complejos. El primero método fue la programación lineal, este es uno de los métodos de cálculo de la programación matemática más utilizados; por su utilidad y posibilidades constituye una de las técnicas de cómputo matemático automatizado más desarrolladas en la actualidad, su teoría y método se refiere a la solución de problemas de optimización, en lo que se busca el valor máximo o mínimo de una función lineal sujeta a determinadas restricciones con un número definido de variables. Los problemas de optimización se componen generalmente de tres elementos: función objetivo, variables y restricciones (Ramos , Sánchez, Ferrer , Barquín , & Linares , 2012).

Con el paso del tiempo se desarrolló una extensión de la programación lineal evitando la restricción de que las relaciones entre las variables fueran lineales, para ello surgió la programación no lineal, esta implica optimizar una función no lineal cumpliendo con restricciones lineales o no lineales. Los problemas de NLP incluyen objetivos con diversas formas no lineales, como cuadráticas, exponenciales, logarítmicas, entre otras, y restricciones que involucran funciones no lineales de las variables de decisión. Estos problemas pueden tener múltiples óptimos locales, superiores a soluciones cercanas, pero no necesariamente las mejores dentro del conjunto factible. La resolución computacional de NLP puede ser desafiante debido a métodos iterativos que no garantizan una convergencia al óptimo global. Los problemas de NLP se pueden clasificar en tipos distintos, como programación lineal, cuadrática, separable, convexa, cada uno con propiedades y algoritmos únicos. (Magnati & Orlin, s.f.) Similar a esta están las derivadas con operadores de Lagrange, cuya utilidad es similar a los LP, pero con métodos matemáticos diferentes (Bertsekas, 1999).

A medida que los problemas se fueron complejizando surgió la programación lineal entera mixta (mixed-integer programming), técnica la cual permite optimizar decisiones que involucran variables discretas y continuas, sujetas a restricciones lineales. Esta técnica es útil para modelar

sistemas complejos que surgen en biología, medicina, transporte, telecomunicaciones, deportes y seguridad nacional, entre otros campos. (Cole Smith & Caner Taskin, 2007)

Con estos problemas más grandes aparecen metodologías que buscan dividirlos en problemas menos complejos, un ejemplo de esto es la programación dinámica, esta es una técnica de optimización que descompone problemas complejos en una serie de problemas más simples, caracterizada por su procedimiento de optimización en múltiples etapas. A diferencia de otras técnicas de optimización, la programación dinámica ofrece un marco general para analizar diversos tipos de problemas, permitiendo el uso de diferentes técnicas de optimización para abordar aspectos específicos de una formulación más amplia. Es necesario ser creativo para identificar cuándo un problema puede ser tratado como un programa dinámico y, a menudo, se requieren ideas ingeniosas para reestructurar el problema y resolverlo de manera efectiva.

Por otro lado, el método de la descomposición es un enfoque general para resolver un problema dividiéndolo en otros más pequeños y resolviendo cada uno de los más pequeños por separado, ya sea en paralelo o secuencialmente. Sobre esta metodología encuentra cabida todo tipo de modelos matemáticos (Boyd et al., 2003).

Otro grupo de metodologías ha encontrado cabida en la solución de problemas de GEP son las metaheurísticas, estas se diferencian de los métodos exactos ofreciendo una vía práctica para encontrar soluciones satisfactorias en escenarios donde la complejidad computacional impide la búsqueda exhaustiva de todas las alternativas. De extendida las heurísticas multiobjetivo son técnicas de optimización que se enfocan en resolver problemas con múltiples objetivos, permitiendo encontrar un conjunto de soluciones que representen compromisos entre los diferentes objetivos (Deb, 2001).

Las metaheurísticas por otro lado ofrecen un marco general para desarrollar nuevos algoritmos híbridos, combinando conceptos de diversos campos como la genética, biología, inteligencia artificial, matemáticas, física y neurología. Dado que generalmente ya existe un método heurístico específico para el problema, la metaheurística se puede considerar como un

marco de trabajo para algoritmos aplicables a diversos problemas de optimización combinatoria con pocos cambios significativos. De hecho, las metaheurísticas son ampliamente reconocidas como una de las mejores aproximaciones para abordar problemas de optimización combinatoria. (Melián et al., 2003)

En este marco, el *Machine Learning* emerge como un enfoque computacional fundamental. Utiliza algoritmos para aprender patrones a partir de datos y así realizar predicciones o tomar decisiones automatizadas (Mitchell, 1997). Esta capacidad de aprendizaje a partir de datos se vuelve relevante en la optimización y toma de decisiones, ya que permite adaptarse a situaciones variables y encontrar soluciones óptimas en entornos dinámicos.

Para el desarrollo de este trabajo, se optó por aplicar la programación lineal como enfoque principal de optimización, debido a su facilidad, flexibilidad y precisión para resolver problemas complejos en el sector energético iterando y permitiendo analizar diversas combinaciones de soluciones, identificando patrones óptimos que se ajustan a las condiciones dinámicas del sistema energético en Colombia, en diferentes escenarios. El marco metodológico propuesto, basado en técnicas avanzadas de optimización, establece una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones en la planificación energética nacional, haciendo de la programación lineal un método adecuado para encontrar configuraciones óptimas en la transición energética.

## 6. Desarrollo del modelo

El modelo tiene como objetivo principal optimizar la inversión y operación de un sistema de generación eléctrica que combina fuentes renovables (solar y eólica) con una central hidroeléctrica con embalse. Se busca encontrar la mejor manera de invertir en generación solar y eólica, y operar el sistema, para minimizar costos y satisfacer la demanda de energía.

Para un análisis detallado de la implementación del modelo, el desarrollo completo del código en Python, incluyendo las simulaciones, optimización y generación de gráficos, se encuentra en el Anexo 3, en el archivo *Modelo.ipynb*.



## 6.1 Preparación y Exploración de Datos:

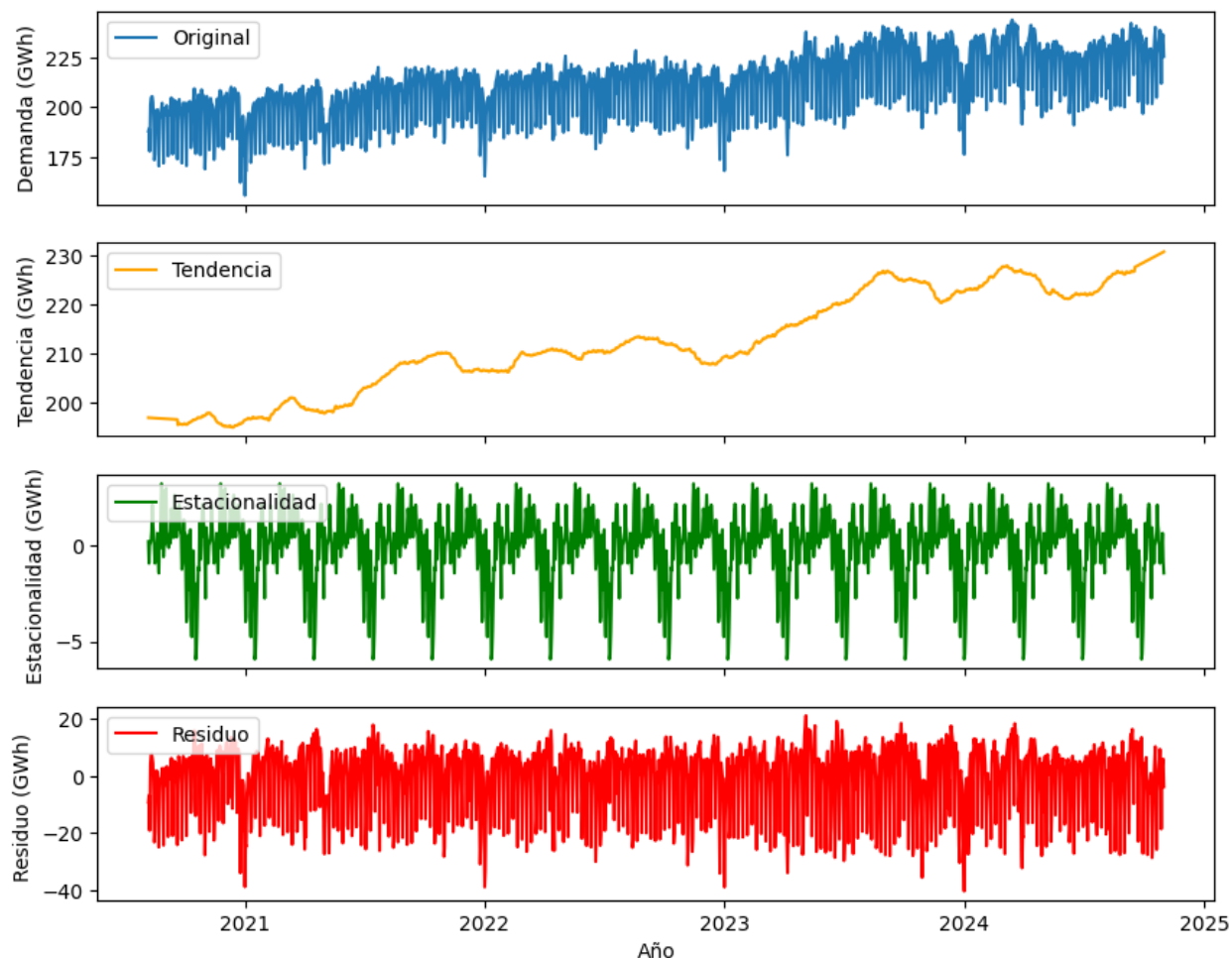
Primero, se importan las bibliotecas necesarias para el análisis, la visualización y la optimización. Luego, se leen los datos históricos de generación, demanda y aportes hídricos desde un archivo Excel y se convierten las fechas al formato adecuado.

Se realiza un análisis exploratorio mediante la visualización de las series de tiempo de demanda, generación solar, eólica e hidráulica. Esto ayuda a comprender el comportamiento de cada variable y a identificar patrones y tendencias.

Para este desarrollo, se realizó un análisis exploratorio de las diferentes variables, comenzando con la demanda. Al descomponer la serie temporal de la demanda, se observa una marcada estacionalidad y una tendencia ascendente, figura 10.

### Figura 10

*Serie de tiempo y descomposición Demanda energía eléctrica en el SIN.*

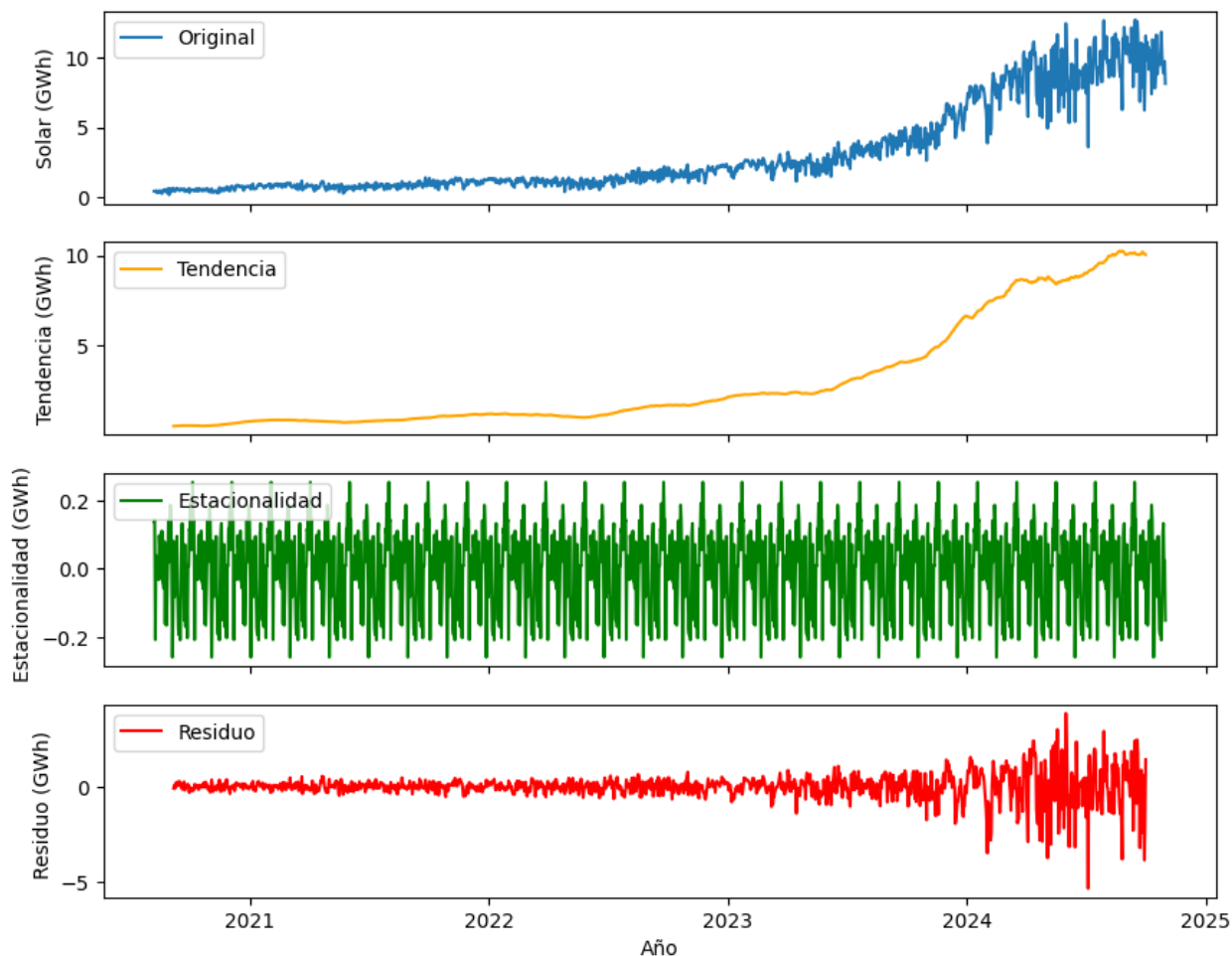


*Fuente: XM. Generación propia (2024).*

Por otro lado, la generación solar muestra una fuerte tendencia ascendente, resultado del desarrollo de nuevos proyectos, como se mencionó en el marco teórico. Además, debido a fenómenos naturales, se observa estacionalidad y una mayor varianza con el paso del tiempo, figura 11.

**Figura 11**

*Serie de tiempo y descomposición Generación Solar*



*Fuente: XM. Generación propia (2024).*

La generación eólica presenta un comportamiento distinto. Como se mencionó en el marco teórico, no se ha registrado la incorporación de una cantidad significativa de nuevos proyectos al sistema interconectado nacional, por lo que la tendencia no es ascendente en el horizonte analizado, figura 12. Sin embargo, sigue mostrando estacionalidad debido a los fenómenos naturales característicos de los vientos. Se puede observar un crecimiento en la generación Eólica a finales de 2022, el cual se debió a la entrada en operación de Guajira I. (ISAGEN, 2021)

**Figura 12**

*Serie de tiempo y descomposición Generación Eólica*

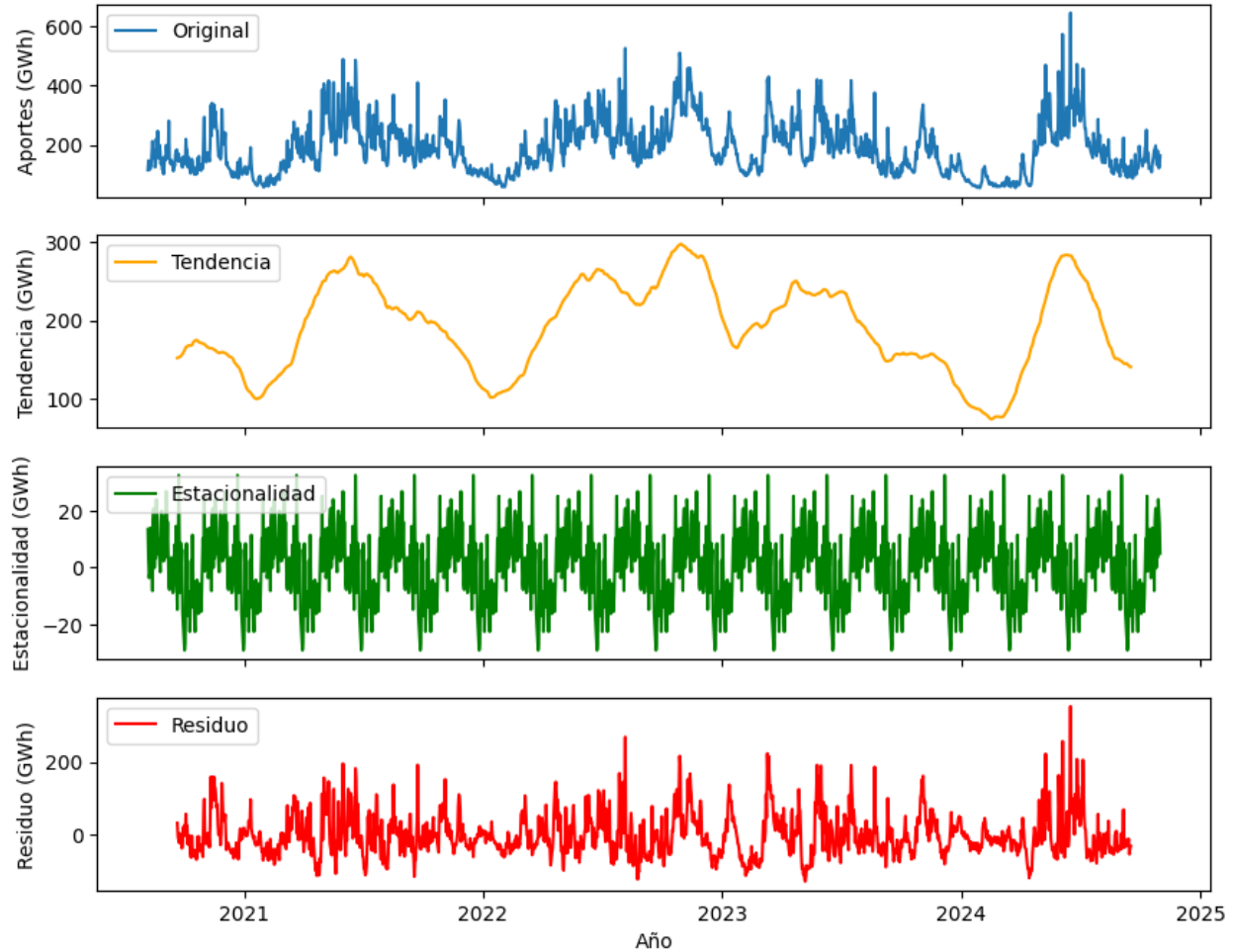


*Fuente: XM. Generación propia (2024).*

Finalmente, los aportes (figura 13) muestran un comportamiento sin una tendencia continua en promedio, pero fluctúan debido a fenómenos naturales. Este fenómeno es estacional, ya que su comportamiento está correlacionado con los ciclos naturales de la Tierra.

**Figura 13**

*Serie de tiempo y descomposición Aportes hídricos.*



*Fuente: XM. Generación propia (2024).*

## 6.2 Preprocesamiento de Datos:

Para la generación solar y eólica, se aplica la técnica de descomposición STL (Seasonal-Trend decomposition using LOESS). Esta técnica separa la serie de tiempo en tres componentes: estacionalidad, tendencia y residuos. El objetivo es eliminar la tendencia de las series de generación solar y eólica. Se trabaja con las series sin tendencia para la optimización.

La principal razón para eliminar la tendencia en este caso es aislar el impacto de las nuevas generaciones y solo permitir la influencia de las variaciones naturales (como los patrones de luz solar y viento) en la generación de energía. Al eliminar la tendencia, que a menudo se debe a factores como las nuevas instalaciones de proyectos y las adiciones de capacidad, se puede centrar en la variabilidad inherente asociada con los recursos solares y eólicos.

La tendencia en los datos de generación solar está fuertemente influenciada por el creciente número de granjas solares. Al eliminar la tendencia, se puede analizar mejor cómo los patrones de luz solar diarios y estacionales afectan la generación, independientemente de las adiciones de capacidad. Similar a la solar, la tendencia al alza en los datos de generación eólica a menudo está vinculada a las nuevas instalaciones de turbinas eólicas. La descomposición permite separar esta tendencia de crecimiento de las fluctuaciones naturales causadas por los cambios en la velocidad y dirección del viento.

Se verifica que las series de generación solar y eólica sin tendencia no contengan valores negativos. Si se encuentran valores negativos, se ajustan sumando un valor pequeño y el valor absoluto del mínimo de la serie, asegurando que todos los valores sean positivos.

### **6.3 Simulación para la evaluación de confiabilidad.**

El objetivo principal de este análisis es evaluar la capacidad del sistema eléctrico para satisfacer la demanda de energía en todo momento, considerando las fuentes de generación disponibles: solar, eólica e hidráulica. En este caso particular, se excluye la generación térmica ya que lo que debería suplir es lo que se obtiene como demanda residual.

La confiabilidad de un sistema eléctrico se refiere a su capacidad para operar de manera continua y sin interrupciones, proporcionando energía a los usuarios de forma segura y eficiente. Para evaluar la confiabilidad, es necesario modelar el comportamiento del sistema a lo largo del tiempo, considerando la variabilidad de la demanda y la disponibilidad de las diferentes fuentes de generación.

Para modelar la confiabilidad del sistema, se utiliza un conjunto de ecuaciones que describen la dinámica del embalse, la generación de energía y la demanda insatisfecha. Partiendo con la definición de unas condiciones iniciales.

Parámetros y Variables Iniciales:

La capacidad máxima de almacenamiento en los embalses

$$C_{max} = 10.000 \text{ GWh}$$

El nivel inicial de agua en los embalses al comienzo de la simulación

$$N_{inicial} = 700 \text{ GWh}$$

Con estas constantes iniciales, se procede a iterar las ecuaciones del nivel del embalse. En cada instante de tiempo  $t$ , correspondiente a un día calendario, se calcula el nivel del embalse.

El nivel, en primer lugar, considera las condiciones del embalse en el periodo previo a la optimización, junto con los aportes recibidos. Esto representa, en términos energéticos, la energía almacenada como agua en forma de energía potencial, sin tener en cuenta la capacidad máxima del embalse. Posteriormente, mediante la ecuación de vertimientos, se calcula el nivel actual, que refleja la energía disponible.

Nivel previo a vertimientos:

$$Np_t = N_{t-1} + A_t$$

Donde:

$Np_t$  Nivel previo a vertimientos en el tiempo  $t$  (GWh)

$N_{t-1}$  Nivel del embalse en el paso de tiempo anterior  $t-1$  (GWh)

$A_t$  Aportes en el tiempo  $t$  (GWh)

Vertimiento:

$$V_t = \max(0, Np_t - C_{max})$$

Nivel Actual:

$$N_t = (Np_t - V_t - GH_t)$$

Paralelamente al cálculo del nivel del embalse se calcula la demanda que no puede ser satisfecha por las energías renovables no convencionales. La cual es la energía que busca ser cubierta por las centrales hidroeléctricas y está representada por la variable  $GH_t$ .

Demanda restante:

$$DR_t = D_t - (GS_t + GE_t)$$

Generación Hidroeléctrica:

$$GH_t = \min (DR_t, N_t, Cm_t) \text{ GWh}$$

Donde:

$Cm_t$  Capacidad maquinas en el tiempo t.

En este caso el dato es de 294 GWh.

Finalmente se hace el balance de la energía que no puede ser cubierta por las fuentes renovables llegando a la demanda insatisfecha.

Demanda Insatisfecha:

$$DI_t = \max(0, DR_t - GH_t) \text{ GWh}$$

Para evaluar la confiabilidad del sistema, se analiza la evolución de la demanda insatisfecha a lo largo del tiempo. Un sistema confiable debería tener una demanda insatisfecha mínima o nula en la mayoría de los períodos. La magnitud y la frecuencia de la demanda insatisfecha son indicadores importantes de la confiabilidad del sistema

Como consideraciones adicionales en este análisis, se han simplificado algunos aspectos del sistema eléctrico, como la capacidad de transmisión y la disponibilidad de las diferentes fuentes de generación. Sin embargo, el modelo matemático presentado proporciona una base sólida para evaluar la confiabilidad del sistema y para identificar posibles áreas de mejora.



#### 6.4 Definición del Modelo de Optimización:

Una vez se analizó la confiabilidad del sistema se buscó calcular cuales tienen que ser las condiciones del sistema para satisfacer la demanda con las fuentes de generación renovables y cuál de estas combinaciones resultaban siendo los resultados óptimos en términos de costo eficiencia considerando el funcionamiento del sistema.

Se define una función objetivo que representa el costo nivelado de energía (LCOE) de un sistema combinado de generación solar y eólica. El objetivo es minimizar este costo, que se calcula en función de los factores de escala aplicados a la generación de cada tecnología y su costo nivelado de energía (LCOE), lo cual representa se calcula dividiendo el costo total de construir y operar una central eléctrica entre la energía total que se generará durante su vida útil.

Objetivo:

Minimizar el costo nivelado de energía (LCOE), representado por la función Z, que depende de los factores de multiplicación para la generación solar (X) y eólica (Y):

$$\text{Min } Z(X, Y) = a * X + b * Y$$

Donde:

Z (X, Y): Representa el costo total de operación.

a: Representa el LCOE asociado a la generación de energía solar.

b: Representa el LCOE asociado a la generación de energía eólica.

X: Representa el factor de escala o multiplicador para la generación solar. (Adimensionales)

Y: Representa el factor de escala o multiplicador para la generación eólica. (Adimensionales)

Para el caso del modelo se tomó como dato de LCOE para la solar en su primer año de operación 89.729.000 \$/GWh y para el caso de la energía eólica 120.525.000 \$/GWh.

En el modelo presentado, la simulación del nivel del embalse se encuentra acoplada al proceso de optimización, actuando como una restricción dinámica. Esto significa que la evolución del nivel del embalse, influenciada por los aportes hídricos, la generación hidráulica y los potenciales vertimientos, es calculada y evaluada dentro de cada iteración del algoritmo de optimización.

Más formalmente, la función de optimización busca minimizar el costo total de generación de energía, sujeto a un conjunto de restricciones, entre las cuales se encuentra la simulación del comportamiento del embalse.

En consecuencia, la simulación del nivel del embalse no se realiza de forma independiente, sino que está integrada al proceso de optimización, proporcionando información crucial para la toma de decisiones y la búsqueda de la solución óptima. Este acoplamiento entre simulación y optimización permite una representación más realista del sistema y una mejor gestión de los recursos hídricos

#### **6.4.1 Restricciones del Modelo**

El modelo de optimización presentado se basa en un conjunto de restricciones que aseguran la factibilidad de las soluciones y reflejan las limitaciones del sistema real.

- Nivel del Embalse: Este cálculo se realiza de forma discreta, considerando la evolución diaria del volumen almacenado. El cálculo del nivel en un día determinado ( $t$ ) se basa en un balance hídrico que integra el nivel del día anterior ( $t-1$ ), representativo del volumen inicial almacenado, los aportes hídricos recibidos durante el día, provenientes principalmente de afluentes fluviales y precipitaciones, y los vertimientos, que ocurren cuando el volumen potencial del embalse supera su capacidad máxima de almacenamiento. Este enfoque permite una representación dinámica del comportamiento del embalse, considerando las fluctuaciones en las entradas y salidas de agua.

El nivel del embalse

$$N_t \leq C_{max}$$

$$N_t = N_{t-1} + A_t - GH_t - V_t$$

Vertimientos solo cuando se excede la capacidad

$$V_t \geq 0$$
$$V_t = \max(0, N_t - C_{max})$$

Donde:

$N_t$  Nivel del embalse en el tiempo t (GWh)

$C_{max}$  Capacidad máxima del embalse (GWh)

$N_{t-1}$  Nivel del embalse en el paso de tiempo anterior t-1 (GWh)

$A_t$  Aportes en el tiempo t (GWh)

$GH_t$  Generación de energía hidroeléctrica en el tiempo t (GWh).

$V_t$  Vertimientos en el tiempo t (GWh)

- Restricción de Generación Solar y Eólica: Esta restricción limita la generación total de energía solar y eólica para que no supere la demanda en cada punto en el tiempo. Esto asegura que la generación hidroeléctrica sea necesaria para cubrir la demanda restante. Se expresa matemáticamente como:

$$D_t \geq X * GS_t + Y * GE_t$$

Donde:

$D_t$  Demanda de energía en el tiempo t (GWh).

$GS_t$  Generación de energía solar en el tiempo t (GWh).

$GE_t$  Generación de energía eólica en el tiempo t (GWh).

- Límite de Generación Hidroeléctrica: Esta restricción limita la generación hidroeléctrica en cada punto en el tiempo por dos factores: la demanda restante (después de la generación solar y eólica) y el nivel actual del embalse. La generación hidroeléctrica no puede superar ninguno de estos dos límites.

$$GH_t \leq D_t - (X * GS_t + Y * GE_t)$$

$$GH_t \leq N_t$$

- Restricción de Demanda: Esta restricción asegura que la generación total de energía (solar, eólica e hidráulica) mayor o igual que la demanda en cada punto en el tiempo. Matemáticamente, se expresa como:

$$X * GS_t + Y * GE_t + GH_t \geq D_t$$

- Límites de los Multiplicadores: Además de las restricciones de demanda y generación solar y eólica, se imponen límites a los valores que pueden tomar los multiplicadores X e Y. Estos límites se definen como:

$$X \geq 1$$

$$Y \geq 1$$

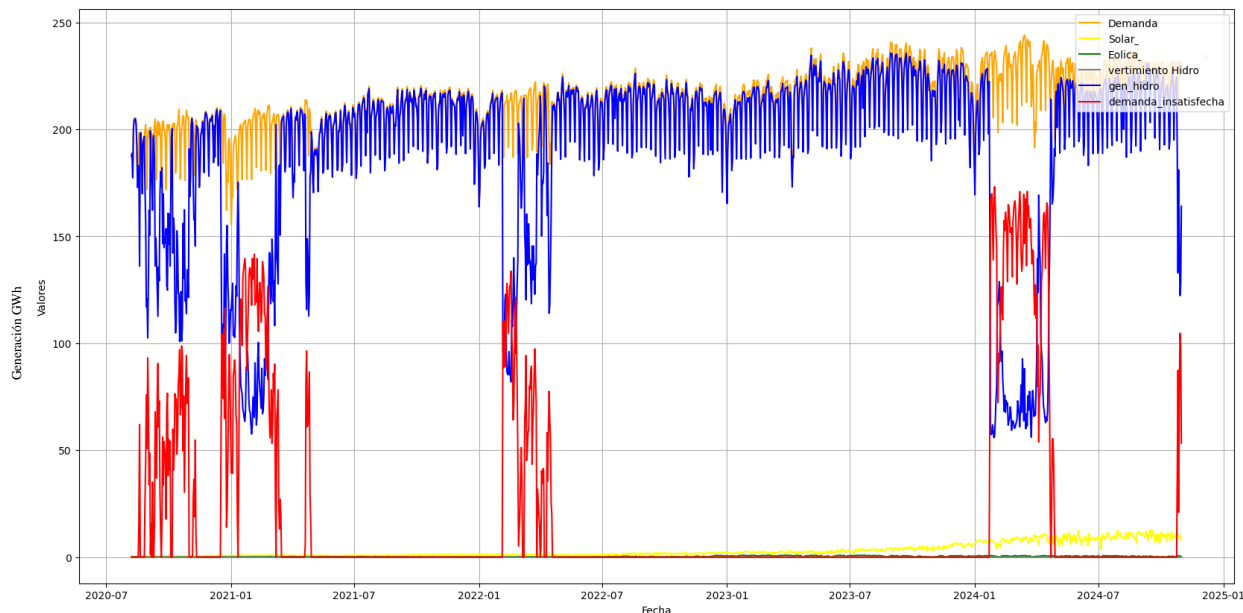
Estos límites se especifican mediante el argumento *bounds* en la función *minimize* y se aplican directamente por el optimizador durante la búsqueda de la solución óptima.

## 6.5 Análisis de Resultados:

Una vez hecho el análisis exploratorio se aplicó el análisis de la confiabilidad aplicando la metodología expuesta anteriormente con la simulación. De la cual se obtuvo la figura 14. Esta nos permite ver cómo la generación hidroeléctrica funge como batería, y permite que se adapte a la demanda. Sin embargo, los niveles de generación por parte de fuentes no convencionales son insignificante. Por tanto, es indispensable la generación termoeléctrica de la cual en Colombia se tiene una capacidad instalada de 6 MW (Sinergox, 2024) aproximadamente para cubrir aquellos momentos puntuales en los que los aportes bajan y en el planteamiento desarrollado en esta investigación.

**Figura 14**

*Simulación confiabilidad sin termoeléctricas.*



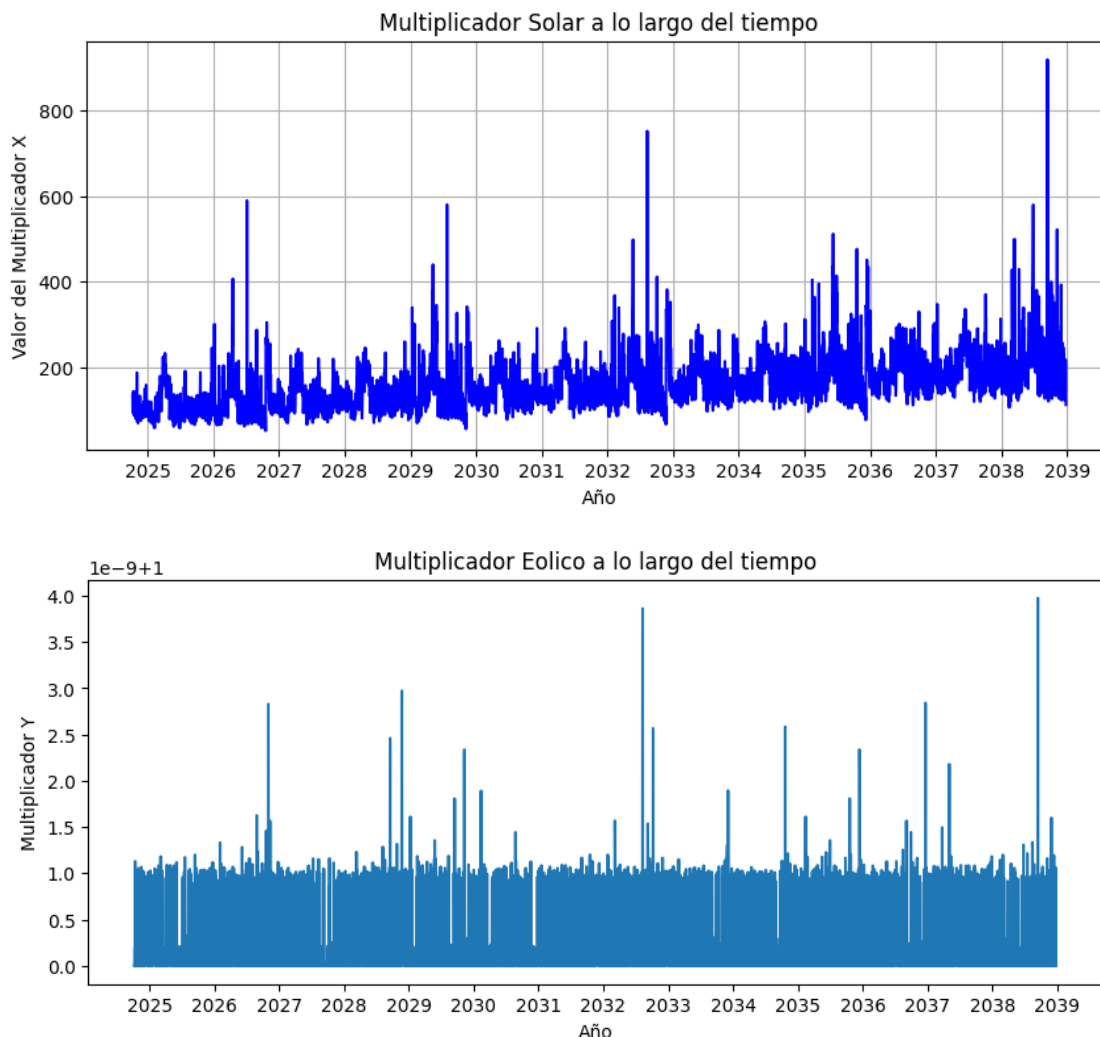
*Fuente: XM. Generación propia (2024).*

Teniendo esto en cuenta se planteó la pregunta de cuál debería ser la capacidad instalada de energías renovables no convencionales para minimizar la generación de fuentes termoeléctricas. Para esto se calculó para cada t un multiplicador con el cual se logrará la combinación más optima de fuentes de generación para los años de demanda media proyectada por la UPME.

Como resultado de este cálculo, se obtuvo la figura 15, que muestra los valores de los multiplicadores. Se observa que estos valores son bastante variables, ya que dependen tanto de las fluctuaciones en la generación de energía debidas a fenómenos naturales como de los cambios en la demanda.

**Figura 15**

*Multiplicadores Solares y Eólicos para proyecciones de demanda.*



*Fuente de datos: Optimización; Creación propia (2024).*

Dado que no es viable tener un sistema distinto para cada situación, surge la pregunta de cómo coordinar de manera óptima estas dos fuentes de energía. ¿Cuál es la combinación de multiplicadores que resulta más eficiente para todos los periodos de tiempo?

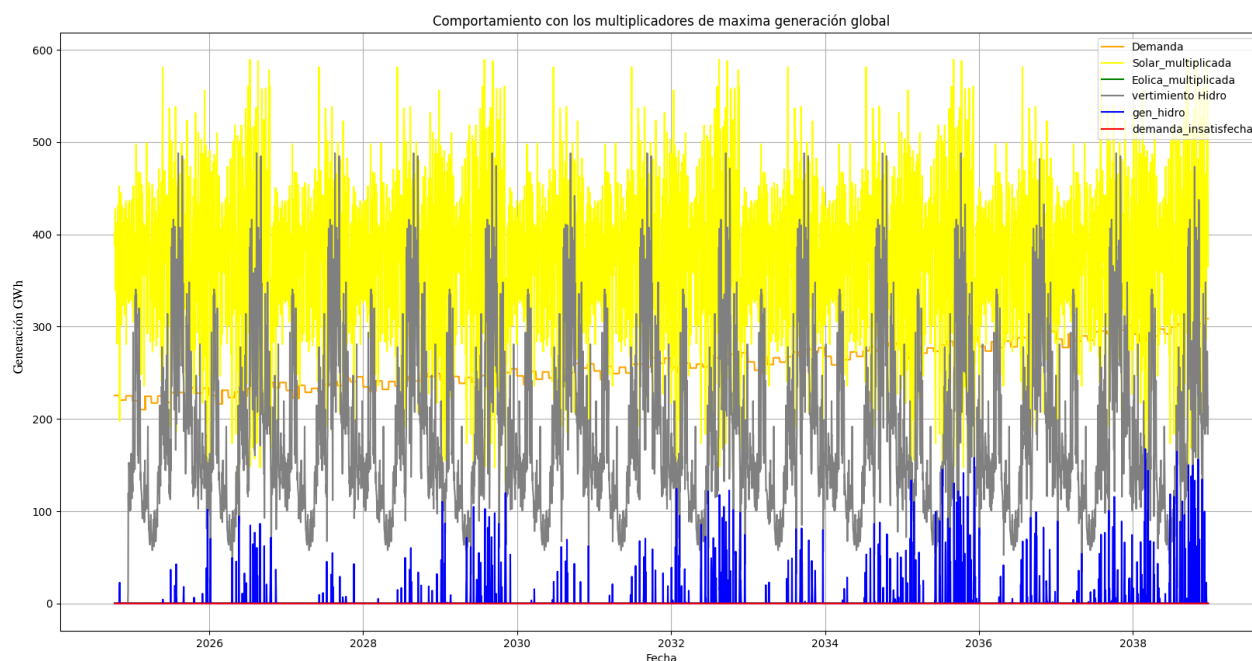
Para abordar esta cuestión, se aplicaron dos métodos: el primero consistió en buscar la combinación de multiplicadores que maximice la generación, garantizando así que no haya demanda insatisfecha; el segundo en utilizar la media de los multiplicadores de las fuentes solar y

eólica. Cabe señalar que estos enfoques se implementaron considerando una demanda con un crecimiento relativamente constante, como se observó en el análisis exploratorio de las variables.

Con el primer enfoque, se buscó eliminar la demanda insatisfecha, lo cual llevó al comportamiento mostrado en la figura 16. Este método logra el objetivo de cubrir la demanda sin déficit, utilizando un multiplicador de **537** para la generación solar y de **1** para la eólica. Además, resulta especialmente interesante observar la cantidad de energía hidráulica que tendría que destinarse a vertimientos para satisfacer la demanda de esta manera.

**Figura 16**

*Simulación sistema con multiplicadores generación máxima.*



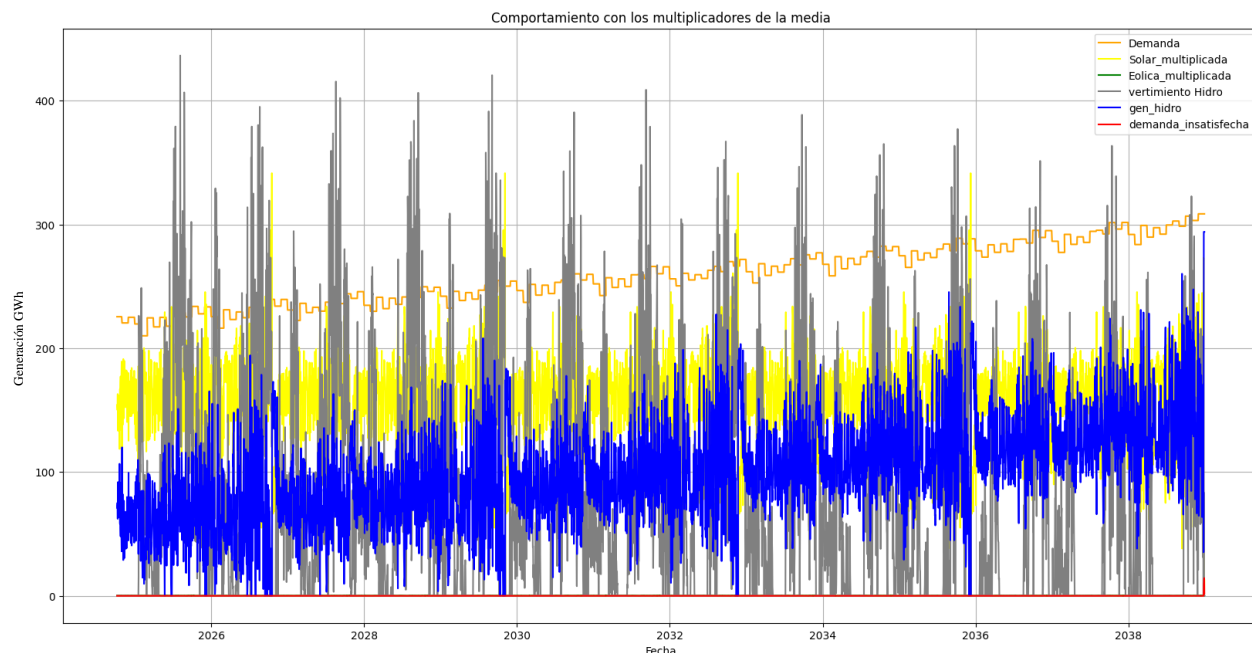
*Fuente de datos: UPME y XM. Creación propia (2024).*

La segunda alternativa consistió en elegir la media de los multiplicadores. Para los datos suministrados, los multiplicadores seleccionados fueron **189** para la generación solar y **1** para la eólica. El resultado obtenido con este enfoque se muestra en la figura 17, donde se observa que, aunque aún se presentan vertimientos, estos son menores en comparación con los del primer método. En este caso, la generación hidroeléctrica no desperdicia tanta agua y, al mismo tiempo,

cubre de manera satisfactoria las fluctuaciones de la generación solar y eólica. Sin embargo, hacia el final de la iteración, se presenta una pequeña demanda insatisfecha.

### Figura 17

*Simulación sistema con multiplicadores generación promedio.*



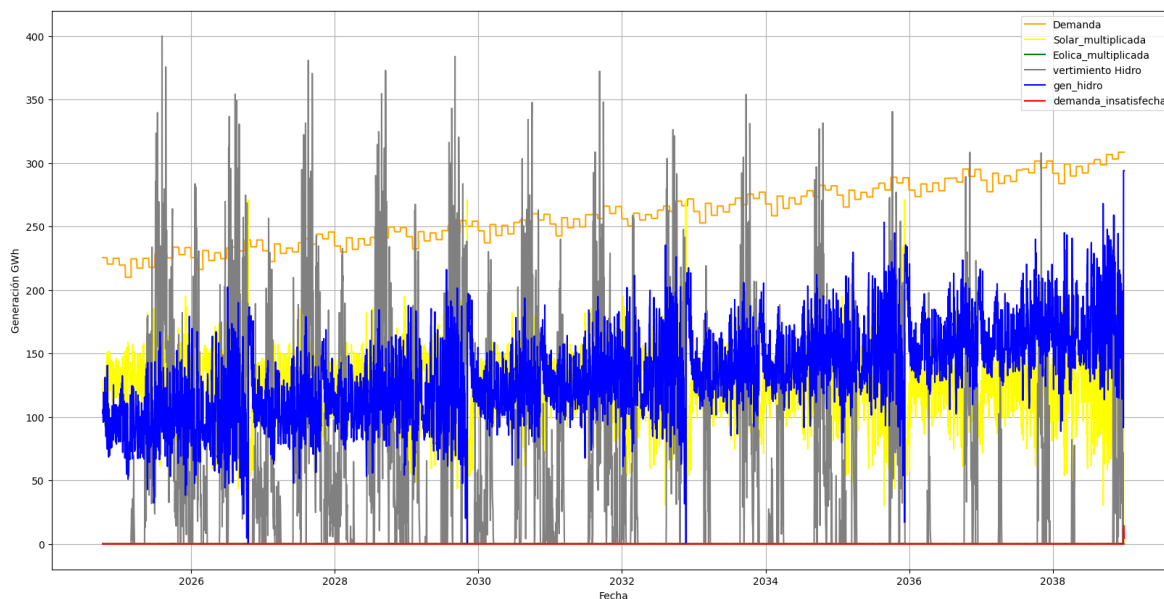
*Fuente de datos: UPME y XM. Creación propia (2024).*

Finalmente, para obtener un mayor detalle en la elección de los multiplicadores, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad del modelo, comenzando con la reducción del multiplicador solar, dado que esta es la tecnología preferida por el modelo. En el análisis, se disminuyó el multiplicador a **150** (figura 18), lo que permitió observar que, aunque la media no representa la solución óptima, al ajustar el multiplicador solar a 150 se reducen los vertimientos y se logra satisfacer la demanda en casi todos los momentos.



**Figura 18**

*Simulación sistema con multiplicador generación solar 150 y eólica 1.*

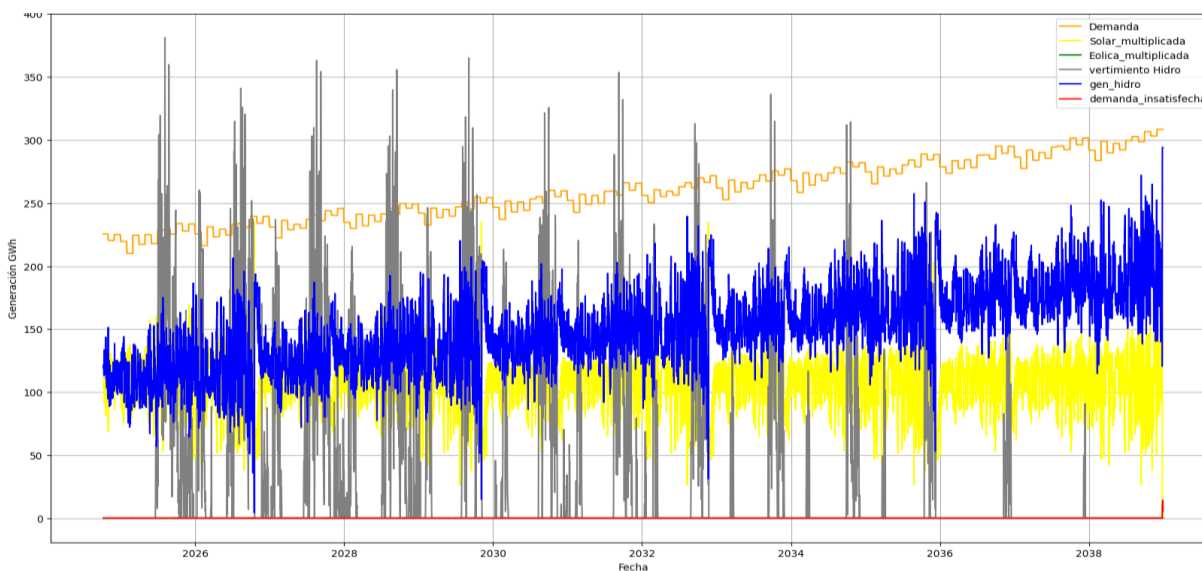


*Fuente de datos: UPME y XM. Creación propia (2024).*

Siguiendo esta misma línea, un multiplicador de **130** resultó ser una solución aún más óptima, sin generar un impacto significativo en la demanda insatisfecha. Figura 19.

**Figura 19**

*Simulación sistema con multiplicador generación solar 130 y eólica 1.*

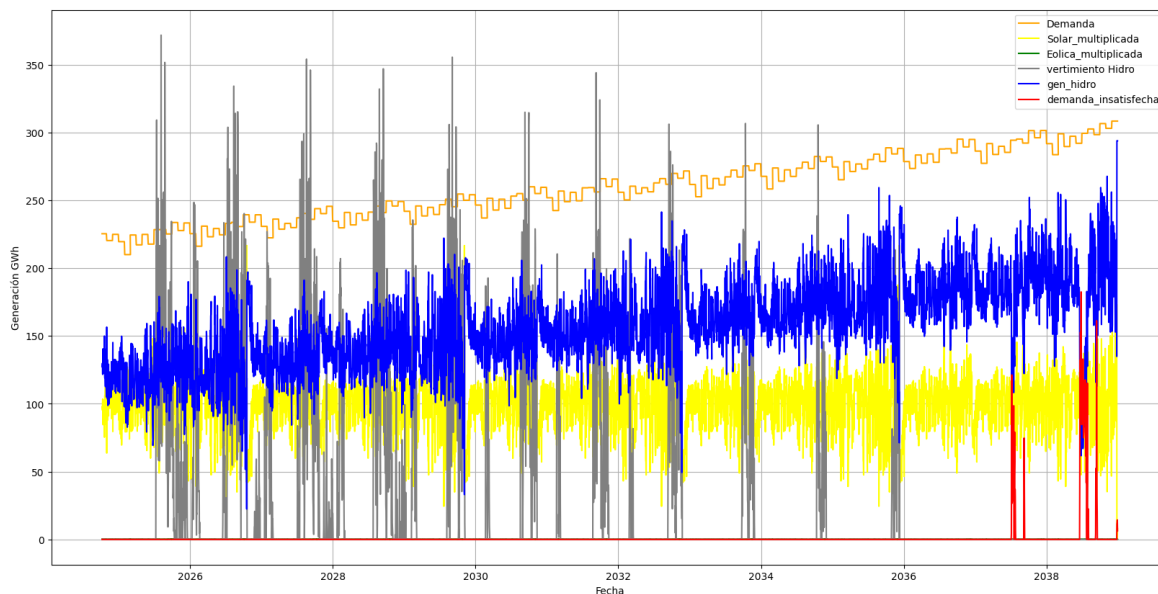


*Fuente de datos: UPME y XM. Creación propia (2024).*

Sin embargo, al reducir el multiplicador solar a **120** y **110**, se observa un aumento considerable en la demanda insatisfecha. Figura 20 y 21.

**Figura 20**

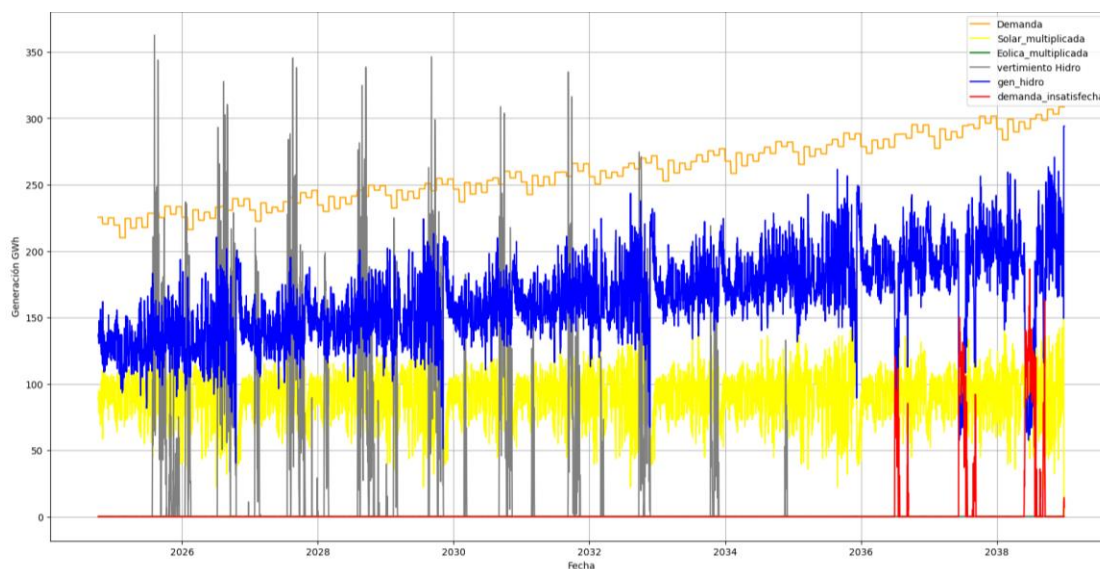
*Simulaciones sistema con multiplicadores generación solar de 120 multiplicador eólico 1.*



*Fuente de datos: UPME y XM. Creación propia (2024).*

**Figura 21**

*Simulaciones sistema con multiplicadores generación solar de 110 multiplicador eólico 1.*



*Fuente de datos: UPME y XM. Creación propia (2024).*

A partir de los análisis realizados, se concluye que el multiplicador óptimo se encuentra en el rango de 130 a 150. No obstante, esta decisión puede depender del criterio del planificador del sistema, quien deberá evaluar el equilibrio entre la inversión requerida y la demanda insatisfecha, teniendo en cuenta también la magnitud de la cobertura de la demanda.

## 7. Conclusiones y recomendaciones

- Se observó que la variabilidad inherente a la generación solar, eólica y los aportes presenta dinámicas extremadamente volátiles. La volatilidad de las fuentes de generación dificulta la sincronización efectiva de estas tres fuentes de energía, lo que complica garantizar un suministro continuo capaz de satisfacer la demanda en todo momento.
- La energía hidráulica es especialmente vulnerable a sequías, lo que representa un riesgo para la estabilidad del sistema energético. Sin embargo, a complementariedad entre la energía solar y la hidráulica puede ofrecer grandes beneficios al sistema, ya que la energía solar puede compensar las fluctuaciones de la generación hidráulica en periodos secos.
- La generación hidroeléctrica tiene la capacidad de suplir parcialmente las funciones de almacenamiento de energía, similares a las de las baterías. Esto facilita la integración de la energía hidroeléctrica al mercado, contribuyendo a mejorar la estabilidad del sistema.
- Considerando únicamente el costo nivelado de energía (LCOE), se determinó que la generación solar tiene mayores prestaciones debido a su menor intermitencia en la producción de energía. Además, la generación solar muestra ser más eficiente en términos de costos operativos frente a los beneficios generados, destacándose como una opción de inversión y expansión de la matriz energética viable y confiable a largo plazo.
- Se recomienda explorar métodos más precisos para la selección de los multiplicadores utilizados en los modelos. Aunque las combinaciones óptimas a nivel global han mostrado ciertos resultados, no reflejan adecuadamente la realidad del sistema, por lo que es

necesario revisar y ajustar estos parámetros para mejorar la representación del comportamiento real.

- Se sugiere investigar alternativas para mejorar la calidad de los datos de generación solar y eólica, con el objetivo de reducir las variaciones excesivas observadas en la serie temporal. Es crucial comprender por qué un aumento en la generación provoca una mayor variabilidad, lo que podría ayudar a mitigar este comportamiento y hacer los modelos más robustos.
- Se recomienda explorar nuevas dinámicas para la gestión y coordinación de las fuentes de generación de energía, buscando formas innovadoras que optimicen la integración de energía solar, eólica e hidráulica, mejorando así la estabilidad y eficiencia del sistema energético en su conjunto.
- Se recomienda considerar la integración de sistemas de almacenamiento energético, como las baterías, para mejorar la gestión de los recursos y aumentar la estabilidad del sistema. Las baterías pueden ayudar a equilibrar la variabilidad de la generación renovable, proporcionando una fuente confiable de energía en momentos de baja generación y permitiendo un aprovechamiento más eficiente de los recursos disponibles.

## 8. Referencias

- Abbas, T., Ashraf, M. M., & Malik, T. N. (2022). Least Cost Generation Expansion Planning Considering Renewable Energy Resources Using Sine Cosine Algorithm. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48(5), 6185–6203. <https://doi.org/10.1007/S13369-022-07303-5/METRICS>
- Anderson, D. (Melián). Models for determining least-cost investments in electricity supply. *JOURNAL OF ECONOMICS AND MANAGEMENT SCIENCE*, 3(1).
- Arango-Aramburo, S., Turner, S., Daenzer, K., Ríos-Ocampo, J., Hejazi, M., & Kober, T. et al. (2019). Climate impacts on hydropower in Colombia: A multi-model assessment of power sector adaptation pathways. *Energy Policy*, 128, 179-188. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.12.057>
- Arias, A. G. (2006). El concepto “energía” en la enseñanza de las ciencias. *Revista Iberoamericana de Education*, 38(2).
- Astolfi, M., Martelli, E., & Pierobon, L. (2017). Thermodynamic and technoeconomic optimization of Organic Rankine Cycle systems. En *Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems: Technologies and Applications* (pp. 0-249). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100510-1.00007-7>
- Balcells, J., Autonell, J., & Barra, V. (2010). Eficiencia en el uso de la energía eléctrica. Marcombo.
- Bertsekas, P. D. (1999). *NonLinear Programming*. Athena Scientific.
- Boyd, S., Xiao, L., & Mutapcic, A. (2003). *Notes on Decomposition Methods*.
- Buitrago Villada, M., García Bujanda, C., Sierra, E., & Matus, M. (2022). Optimal Expansion and Reliable Renewable Energy Integration in Long-Term Planning Using FESOP. *IEEE Power and Energy Conference*. <https://doi.org/10.1109/kpec54747.2022.9814781>
- Bussar, C., Stöcker, P., Moraes, L., Jacqué, K., Axelsen, H., & Sauer, D. U. (2017). The Long-Term Power System Evolution – First Optimisation Results. *Energy Procedia*, 135, 347–357. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.526>
- Chong, K.P. and Zak, S.H. (2013) *An Introduction to Optimization*. 4th Edition, John Wiley & Sons, Hoboken.

- Cole Smith, J., & Caner Taskın, Z. (26 de Marzo de 2007). A Tutorial Guide to Mixed-Integer Programming Models and Solution Techniques. Department of Industrial and Systems Engineering - University of Florida.
- CREG. (Julio de 2023). Proyección de la demanda de energía eléctrica y potencia máxima 2023-2037. Obtenido de [https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/UPME\\_Proyeccion\\_demand\\_a\\_2023-2037\\_VF2.pdf](https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/UPME_Proyeccion_demand_a_2023-2037_VF2.pdf)
- CREG. (s.f.). Cómo funciona el mercado eléctrico de Colombia. Obtenido de <https://creg.gov.co/publicaciones/8206/como-funciona-el-mercado-electrico-de-colombia/>
- CRIE (Comisión regional de interconexión eléctrica). (1 de enero de 2019). REGLAMENTO DEL MERCADO ELÉCTRICO REGIONAL -RMER-. Obtenido de <https://www.enteoperador.org/wp-content/uploads/2019/04/RMER-010119.pdf>
- Da Silva, D. J., Belati, E. A., & López-Lezama, J. M. (2023). A Mathematical Programming Approach for the Optimal Operation of Storage Systems, Photovoltaic and Wind Power Generation. *Energies*, 16(3), 1269.
- Deb, Kalyan. (2001). Multiobjective Optimization Using Evolutionary Algorithms. Wiley, New York.
- Draganov, A. (2022). Mathematical Tools for Real-World Applications. The MIT Press.
- Ebrahimi, M., & Sheikhi, A. (2023). A local integrated electricity-heat market design among multi-Smart Energy Hubs with renewable energy generation uncertainty. *Electric Power Systems Research*, 218, 109217. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109217>
- Edwin K. P. Chong, S. H. (2013). An Introduction to Optimization. Wiley.
- Garcia, J. D., Leal, I., Chabar, R., & Pereira, M. V. (2023). A Multicut Approach to Compute Upper Bounds for Risk-Averse SDDP. <http://arxiv.org/abs/2307.13190>
- Garcia-Guarin, J., Rodriguez, D., Alvarez, D., Rivera, S., Cortes, C., & Guzman, A. et al. (2019). Smart Microgrids Operation Considering a Variable Neighborhood Search: The Differential Evolutionary Particle Swarm Optimization Algorithm. *Energies*, 12(16), 3149. <https://doi.org/10.3390/en12163149>
- Granados, C., Castañeda, M., Zapata, S., Mesa, F., & Aristizábal, A. J. (2022). Feasibility analysis for the integration of solar photovoltaic technology to the Colombian residential sector

- Heidari, A., Bansal, R. C., Md. Jahangir Hossain, & Zhu, J. (2022). Strategic risk aversion of smart energy hubs in the joined energy markets applying a stochastic game approach. 349, 131386–131386. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131386>
- Henao, F., Rodriguez, Y., Viteri, J., & Dyer, I. (2019). Optimising the insertion of renewables in the Colombian power sector. *Renewable Energy*, 132, 81-92. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.099>
- ISAGEN. (2021). *Informe de Gestion 2021*. Obtenido de <https://www.isagen.com.co/documents/20123/34932/Informe-Gestion-2021.pdf>
- Jing, Y., Duan Zhiqiang, Gao Jiemai, Chen Siyuan, Bing, Z., & Wang Yajie. (2022). Coordinated Control Strategy of Electricity-Heat-Gas Integrated Energy System Considering Renewable Energy Uncertainty and Multi-Agent Mixed Game. 10. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.943213>
- Ley 1715 de 2014. (2014). Recuperado de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353>
- Magnati, T., & Orlin, J. (s.f.). 15.053: Optimization Methods in Business Analytics. Obtenido de Chapter - 13: Nonlinear Programming: <https://web.mit.edu/15.053/www/AMP-Chapter-13.pdf>
- Massé, P., & Gibrat, R. (1957). Application of Linear Programming to Investments in the Electric Power Industry. <https://doi.org/10.1287/mnsc.3.2.149>, 3(2), 149-166. <https://doi.org/10.1287/MNSC.3.2.149>
- Melián, B., Moreno Pérez, J. A., Marcos, / J, & Vega, M. (2003). Heurísticas: Una visión Global. <http://redalyc.uaemex.mx>
- Michinel, J. L., & Martínez, A. D. A. (1994). El concepto de energía en los libros de textos: de las concepciones previas a la propuesta de un nuevo sublenguaje. *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 369-380.
- Mitchell, T. M. . (1997). *Machine learning*. McGraw-Hill.
- Ministerio de Minas y Energía (2021). Transición energética: un legado para el presente y el futuro de Colombia. Recuperado de [https://www.minenergia.gov.co/documents/5856/TRANSICION\\_ENERGETICA\\_COLOMBIA\\_BID-MINENERGIA-2403.pdf](https://www.minenergia.gov.co/documents/5856/TRANSICION_ENERGETICA_COLOMBIA_BID-MINENERGIA-2403.pdf)



- Mori Koichi Takeda, H. (1993). Parallel Simulated Annealing for Power System Decomposition.
- Mundotiya, P., Mathuria, P., & Tiwari, H. (2022). Mathematical Approach-Based Power System Analysis: A Review of Short-Term Hydro Scheduling. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 802, 85–98. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-6081-8\\_5/COVER](https://doi.org/10.1007/978-981-16-6081-8_5/COVER)
- Nocedal, J., & Wright, S. J. (2002). *Numerical Optimization Second Edition*.
- Oree, V., Sayed Hassen, S. Z., & Fleming, P. J. (2017). Generation expansion planning optimisation with renewable energy integration: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 790-803. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.11.120>
- Ortiz, P., Kubler, S., & Rondeau, É. (2022). CANO: A lightweight Carbon emission and inhabitants' energy Needs Optimization model. ResearchGate; Elsevier. [https://www.researchgate.net/publication/363125604\\_CANO\\_A\\_lightweight\\_CARbon\\_e\\_mission\\_and\\_inhabitants'\\_energy\\_Needs\\_Optimisation\\_model](https://www.researchgate.net/publication/363125604_CANO_A_lightweight_CARbon_e_mission_and_inhabitants'_energy_Needs_Optimisation_model)
- OSWALD, Úrsula. Seguridad, disponibilidad y sustentabilidad energética en México. *Rev. mex. cienc. polít. soc* [online]. 2017, vol.62, n.230, pp.155-195. Disponible en: <[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0185-19182017000200155&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-19182017000200155&lng=es&nrm=iso)>. ISSN 0185-1918.
- Ramos , A., Sánchez, P., Ferrer , J. M., Barquín , J., & Linares , P. (2012). *MODELOS MATEMÁTICOS DE OPTIMIZACIÓN*. Madrid: Universidad de Comillas.
- Ramos-Gutiérrez, L. D. J., & Montenegro-Fragoso, M. (2012). La generación de energía eléctrica en México. *Tecnología y ciencias del agua*, 3(4), 197-211.
- Rendon-Cardona, E. A., Salazar, H., & Tobon-Villa, J. E. (2022). An Intraday Market Design for Colombia's Energy Transition. *IEEE Access*, 10, 117544–117560. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3219079>
- Ruan, Y., Liang, Z., Qian, F., Meng, H., & Gao, Y. (2022). Operation strategy optimization of combined cooling, heating, and power systems with energy storage and renewable energy based on deep reinforcement learning. 65, 105682–105682. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105682>
- Rudnick, H., Palma, R., Cura, E., & Suva, C. (1996). Economically adapted transmission systems in open access schemes -application of genetic algorithms. *IEEE Transactions on Power Systems*, 11(3), 1427-1440. <https://doi.org/10.1109/59.535684>



- Schaeffer, P. V., & Cherene, L. J. (1989). The inclusion of ‘spinning reserves’ in investment and simulation models for electricity generation. *European Journal of Operational Research*, 42(2), 178-189. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(89\)90320-2](https://doi.org/10.1016/0377-2217(89)90320-2)
- Schmidt, J., Cancellar, R., & Pereira, A. (2016). An optimal mix of solar PV, wind, and hydro power for a low-carbon electricity supply in Brazil. *Renewable Energy*, 85, 137-147. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.010>
- Sercolombia - Asociación energías renovables. (s.f.). Registro de proyectos generación de energía eléctrica. Obtenido de <https://ser-colombia.org/wp-content/uploads/2020/12/Procedimiento-%E2%80%93-Registro-de-Proyectos-de-Generaci%C3%B3n.pdf>
- Sweeney, D., Sweeney, D. J., Williams, T. A., Camm, J. D., & Martin, K. (2011). *Métodos cuantitativos para los negocios*. Cincinnati: Cengage.
- Tariq, S., Safder, U., & Yoo, C. (2022). Exergy-based weighted optimization and smart decision-making for renewable energy systems considering economics, reliability, risk, and environmental assessments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 162, 112445.
- Unidad de Planeación Minero-Energética. (2021). Plan Energético Nacional 2021-2050. Documento para consulta pública. UPME. Obtenido de [https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN\\_documento\\_para\\_consulta.pdf](https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN_documento_para_consulta.pdf)
- Unidad de Planeación Minero-Energética. (2022a). Demanda y Eficiencia. Obtenido de <https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia>
- UPME. (2023). INFORME DE AVANCE PROYECTOS DE GENERACIÓN – JULIO 2023.
- UPME. (31 de octubre de 2023). Informe de Registro de Proyectos de Generación. Obtenido de [https://www1.upme.gov.co/siel/Inscripcion\\_proyectos\\_generacion/Registro\\_Octubre\\_2023.pdf](https://www1.upme.gov.co/siel/Inscripcion_proyectos_generacion/Registro_Octubre_2023.pdf)
- UPME. (septiembre de 2023). INFORME DE AVANCE PROYECTOS DE GENERACIÓN – SEPTIEMBRE 2023. Obtenido de SUBDIRECCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA – GRUPO DE GENERACIÓN: [https://www1.upme.gov.co/siel/Seguimiento\\_proyectos\\_generacion/Informe\\_Avance\\_proyectos\\_Generacion\\_Octubre\\_2023.pdf](https://www1.upme.gov.co/siel/Seguimiento_proyectos_generacion/Informe_Avance_proyectos_Generacion_Octubre_2023.pdf)

- Vargas, F. E. S., Alarcón, A. F. S., & Fajardo, C. A. G. (2011). Pequeñas y microcentrales hidroeléctricas: alternativa real de generación eléctrica. *Informador Técnico*, 75.
- XM. (2022). Demanda de energía en 2021 marca máximos históricos. XM. <https://www.xm.com.co/noticias/4590-demanda-de-energia-en-2021-marca-maximos-historico>
- XM. (s.f.). Obtenido de Synergox: <https://sinergox.xm.com.co/Paginas/Home.aspx>
- Sinergox. (2024). CEN por tipo fuente natural y despacho. Sinergox. <https://sinergox.xm.com.co/oferta/Paginas/Informes/CapacidadEfectiva.aspx>

## 9. Anexos

Se adjuntan tres archivos que complementan el análisis y desarrollo del trabajo de grado:

1. Datos históricos (Excel: *DatosT3*): Este archivo contiene los datos históricos de demanda, generación solar, eólica e hidráulica, y aportes a los embalses utilizados como base para el análisis.
2. Datos proyectados (Excel: *DatosT4*): Incluye los datos proyectados para los mismos indicadores, empleados en las simulaciones.
3. Código de optimización y simulación (Python Notebook: *Modelo*): Archivo Jupyter Notebook (.ipynb) que contiene el desarrollo completo del código, incluyendo las simulaciones, optimización y gráficos generados en el proceso.

Todos los archivos están disponibles en la siguiente carpeta compartida: [https://eiaedu-my.sharepoint.com/:f:/g/personal/maria\\_estupinan\\_eia\\_edu\\_co/ErKoIawNu1VKoDALkf96I-YBFLLxI1VEKb3BrJWNFrXHGg?e=ak1QPS](https://eiaedu-my.sharepoint.com/:f:/g/personal/maria_estupinan_eia_edu_co/ErKoIawNu1VKoDALkf96I-YBFLLxI1VEKb3BrJWNFrXHGg?e=ak1QPS)