

MATRICES ENERGÉTICAS DE BRASIL Y COLOMBIA, UN ENFOQUE EN LA ENERGÍA NUCLEAR

Resumen

La configuración de las matrices energéticas es un factor clave para la seguridad de suministro, la sostenibilidad ambiental y el desarrollo económico. En América Latina, Brasil y Colombia poseen recursos naturales similares; hídricos, fósiles y renovables no convencionales, que permitirían trayectorias energéticas comparables. No obstante, sus políticas y marcos institucionales han generado modelos distintos, especialmente respecto al uso de la energía nuclear, presente en Brasil, pero ausente en Colombia.

Este contraste constituye el eje del artículo, cuyo problema de investigación se centra en cómo están compuestas las matrices energéticas de ambos países y qué papel juega la energía nuclear. La hipótesis sostiene que, pese a recursos semejantes, las diferencias político-económicas explican las divergencias en sus estructuras energéticas. Analizar estas diferencias es relevante porque la matriz determina la capacidad de atender la demanda con seguridad y la vulnerabilidad frente a fenómenos climáticos como El Niño, que afectan sistemas hidroeléctricos. Además, la energía nuclear representa una alternativa firme, baja en carbono y de alta densidad energética, con importancia estratégica en la transición global.

Desde el desarrollo del artículo se busca describir y comparar las matrices energéticas de Brasil y Colombia, subrayando el rol de la energía nuclear. Los objetivos específicos incluyen conceptualizar la matriz y la energía nuclear, detallar la composición de ambas matrices y analizar el papel de esta fuente en la planificación de cada país. La metodología se basa en una revisión bibliográfica y



documental, apoyada en informes de organismos internacionales y entidades oficiales, con un enfoque descriptivo y comparativo.

Palabras clave: Brasil, Colombia, energía nuclear, matriz energética, transición energética.

Abstract

The configuration of energy matrices is a key factor for security of supply, environmental sustainability, and economic development. In Latin America, Brazil and Colombia have similar natural resources—hydropower, fossil fuels, and unconventional renewables—that would allow for comparable energy trajectories. However, their policies and institutional frameworks have generated different models, especially with regard to the use of nuclear energy, which is present in Brazil but absent in Colombia.

This contrast is the focus of the article, whose research question centers on how the energy matrices of both countries are composed and what role nuclear energy plays. The hypothesis is that, despite similar resources, political and economic differences explain the divergences in their energy structures. Analyzing these differences is relevant because the matrix determines the capacity to meet demand safely and the vulnerability to climatic phenomena such as El Niño, which affect hydroelectric systems. In addition, nuclear energy represents a reliable, low-carbon, high-energy-density alternative with strategic importance in the global transition.

This article seeks to describe and compare the energy matrices of Brazil and Colombia, highlighting the role of nuclear energy. Specific objectives include conceptualizing the matrix and nuclear energy, detailing the composition of both matrices, and analyzing the role of this source in each country's planning. The



methodology is based on a bibliographic and documentary review, supported by reports from international organizations and official entities, with a descriptive and comparative approach.

Keywords: Brazil, Colombia, nuclear energy, energy matrix, energy transition.

Introducción

La configuración de las matrices energéticas de los países constituye un factor estratégico para garantizar la seguridad de suministro, la sostenibilidad ambiental y el desarrollo económico. En América Latina, Brasil y Colombia comparten una dotación considerable de recursos naturales, principalmente hídricos, fósiles y renovables no convencionales, lo que en principio permitiría imaginar trayectorias similares en la forma como estructuran sus sistemas energéticos.

Sin embargo, la evidencia muestra que sus políticas, prioridades económicas y marcos institucionales han dado lugar a composiciones distintas, particularmente en lo que respecta al uso de la energía nuclear. A partir de este contraste surge el problema de investigación: ¿cómo están compuestas las matrices energéticas de Brasil y de Colombia y qué papel juega la energía nuclear en cada una de ellas? La hipótesis que orienta el presente artículo sostiene que, aunque ambos países cuentan con recursos semejantes, las diferencias político-económicas han derivado en la adopción de modelos energéticos divergentes, reflejados en la presencia de generación nuclear en Brasil y en la ausencia de esta fuente en el caso colombiano.

El análisis de estas diferencias resulta fundamental por varias razones. En primer lugar, porque la matriz energética define no solo la capacidad de un país para satisfacer la demanda de energía de forma segura, eficiente y competitiva desde el costo por kWh como un lugar más atractivo de inversión, sino también, su grado de



vulnerabilidad frente a fenómenos climáticos como sequías prolongadas o fenómenos de El Niño, que afectan con especial intensidad a sistemas altamente dependientes de la hidroelectricidad. En segundo lugar, porque la energía nuclear se presenta como una alternativa firme, de bajas emisiones de carbono y de alta densidad energética -mayor horas años de funcionamiento vs otras fuentes-, con un potencial estratégico en el contexto de la transición energética global, además, los grandes data center del mundo, buscan economías que dispongan en sus matrices la energía nuclear (Izzo, 2017).

Adicional a eso, porque comprender el contraste entre dos países vecinos que comparten condiciones geográficas similares, pero que han tomado decisiones diferentes respecto a la adopción de la energía nuclear, aporta elementos valiosos para la toma de decisiones en materia de política energética, tanto a nivel nacional como regional.

El propósito general del artículo es describir la composición de las matrices energéticas de Brasil y Colombia con especial atención al papel que desempeña la energía nuclear. Para alcanzar este objetivo, se plantean tres propósitos específicos: conceptualizar la noción de matriz energética y de energía nuclear, explicando su relevancia en el contexto actual; describir la composición de las matrices energéticas de ambos países a partir de fuentes oficiales y literatura especializada, incluyendo un cuadro comparativo; y analizar el rol que la energía nuclear cumple en la matriz brasileña y el lugar que ocupa en la planificación colombiana.

La metodología empleada corresponde a una revisión bibliográfica de carácter descriptivo y comparativo, sustentada en informes institucionales de organismos internacionales como la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), la



Agencia Internacional de Energía (IEA), la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA) y el World Energy Council (WEC), así como en documentos oficiales de planeación energética elaborados por la Empresa de Pesquisa Energética (EPE) en Brasil y la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) en Colombia, complementados con literatura académica y técnica reciente. De este modo, el artículo no pretende presentar resultados empíricos originales, sino integrar y analizar la evidencia existente para ofrecer una visión crítica y comparativa de las decisiones energéticas de Brasil y Colombia frente a la energía nuclear en sus respectivas matrices.

Planteamiento del problema

Las decisiones que los Estados adoptan en torno a su matriz energética definen en gran medida su capacidad de garantizar seguridad de suministro, sostenibilidad ambiental y crecimiento económico. En América Latina, países como Brasil y Colombia comparten condiciones geográficas y recursos naturales abundantes particularmente hídricos, fósiles y renovables no convencionales, lo que permitiría anticipar configuraciones energéticas similares (Asturias y Arias, 2016).

Sin embargo, al analizar la evolución de sus matrices se evidencia un contraste significativo: mientras Brasil ha integrado la energía nuclear a través de centrales en operación y proyectos en expansión, Colombia carece de capacidad instalada nuclear y solo contempla esta alternativa en escenarios de planeación de largo plazo (Ugarteche y Hernández, 2023). Este hecho plantea la pregunta central de la presente investigación: ¿cómo están compuestas las matrices energéticas de Brasil y de Colombia y qué papel juega la energía nuclear en cada una de ellas? La pertinencia del estudio radica en que la dependencia de fuentes como la hidroelectricidad expone a ambos países a riesgos derivados de fenómenos



climáticos extremos, como sequías o El Niño, lo cual hace necesario analizar opciones complementarias firmes y bajas en carbono, entre ellas la energía nuclear.

Además, comprender las razones que explican la divergencia en la adopción o ausencia de esta fuente permite aportar elementos a la discusión sobre política energética y transición hacia sistemas más resilientes y sostenibles. El objetivo general de este trabajo es describir la composición de las matrices energéticas de Brasil y Colombia con especial atención al rol de la energía nuclear, lo cual se desglosa en tres propósitos específicos: conceptualizar qué es una matriz energética y por qué la energía nuclear resulta relevante; caracterizar la composición energética de ambos países mediante una revisión de fuentes oficiales y literatura especializada; y evaluar el papel que desempeña la nuclear en la matriz brasileña frente a su consideración en la planificación colombiana.

El alcance de la investigación se limita a un análisis de carácter descriptivo y comparativo basado en una revisión bibliográfica de fuentes institucionales, académicas y técnicas actualizadas, de modo que el aporte principal se centra en ofrecer una visión crítica y documentada de los contrastes entre Brasil y Colombia en materia de energía nuclear dentro de sus respectivas matrices.

Formulación del problema

¿Cómo están compuestas las matrices energéticas de Brasil y de Colombia, y qué papel juega la energía nuclear?



Justificación

El estudio comparativo de las matrices energéticas de Brasil y Colombia, con énfasis en el papel de la energía nuclear, se justifica por su pertinencia académica, social y política en un momento en el que la transición hacia sistemas energéticos más sostenibles y resilientes constituye una prioridad global. La energía es un recurso estratégico que condiciona la competitividad de los países, su estabilidad macroeconómica y la calidad de vida de la población, de modo que comprender cómo se configuran las matrices energéticas permite identificar fortalezas, vulnerabilidades y oportunidades de mejora en la planificación del sector (Ocampo et al., 2023).

Analizar a Brasil y Colombia resulta particularmente relevante porque, a pesar de compartir recursos hídricos y potencial en renovables, han adoptado trayectorias distintas: Brasil cuenta con centrales nucleares en operación y proyectos en marcha, mientras que Colombia aún no incorpora esta fuente y únicamente la contempla como alternativa en sus planes de largo plazo, pues no cuenta con una ley nuclear y esta se encuentra en la actualidad en debate en el Congreso de la República. Estas diferencias evidencian el peso de factores como la política energética, la estabilidad institucional, la inversión en infraestructura y la aceptación social de la energía nuclear (Araujo, 2023).

El trabajo cobra valor adicional porque permite visibilizar los riesgos asociados a la dependencia de fuentes hidroeléctricas en contextos de variabilidad climática, fenómeno que ha impactado a ambos países con sequías y eventos de El Niño, y que plantea la necesidad de evaluar tecnologías firmes y bajas en carbono. En este sentido, la investigación aporta elementos de reflexión que pueden nutrir la toma de decisiones en política pública y regulación, al tiempo que contribuye a la discusión



académica sobre el papel que la energía nuclear puede desempeñar en la región como complemento a la expansión de las energías renovables.

Así, la relevancia del artículo no se limita al plano descriptivo, sino que ofrece una mirada crítica y comparativa que ayuda a comprender por qué dos países vecinos, con condiciones similares, difieren en la integración de una fuente estratégica para la seguridad energética y la sostenibilidad a largo plazo.

Objetivo General

Describir la composición de las matrices energéticas de Brasil y Colombia, con un enfoque particular en el papel de la energía nuclear.

Objetivos Específicos

- Conceptualizar la Matriz Energética y la Energía Nuclear.
- Describir la composición de la matriz energética de Brasil y Colombia, por medio de una comparación final.
- Determinar el rol de la energía nuclear en las matrices energéticas de Brasil y Colombia.

Desarrollo del artículo

El desarrollo del artículo se llevará a cabo desde cuatro puntos fundamentales. Primero, la fundamentación conceptual; qué es y porque es importante la matriz energética y el lugar de la energía nuclear en la misma; segundo, América Latina y el contexto regional de las matrices energéticas; tercero, la matriz energética de Brasil, abordada desde la hidroelectricidad, la diversificación y la apuesta nuclear; cuarto, la matriz energética de Colombia, abordada desde la hidro dependencia, las políticas, avances y limitaciones de las renovables en ascenso y la nuclear como



posibilidad, y, finalmente, la discusión comparativa de las convergencias y divergencias.

1. Fundamentos conceptuales: la matriz energética y el lugar de la energía nuclear.

En los estudios de planificación, la matriz energética designa la representación sistemática de la oferta y el uso de energía de un país en un período determinado. Dicha representación se organiza en un balance energético que distingue entre energía primaria (recursos en su forma original: petróleo crudo, gas natural, carbón, hidro, solar, viento, uranio, etc.), los procesos de transformación (refinación, generación eléctrica, coquerías, plantas de biocombustibles), las pérdidas asociadas y el consumo final por sectores (industria, transporte, residencial, comercial, agropecuario) (World Economic Forum, 2024). En América Latina, la metodología de referencia es la estandarizada por OLADE, cuyo Manual de Estadísticas Energéticas y guías de balances energéticos precisan definiciones, unidades, conversiones y estructura matricial, y orientan la construcción del balance nacional y de sub-balances como los de electricidad, derivados del petróleo y biomasa. Esta contabilidad permite “ver” el sistema como un flujo integrado desde la extracción hasta los usos finales, y comparar países con criterios homogéneos.

La matriz eléctrica es un subconjunto del balance: describe la mezcla tecnológica con la que se genera electricidad (hidro, térmicas a gas o carbón, nuclear, eólica, solar, biomasa, geotermia). Aunque a veces se las confunde, matriz energética y matriz eléctrica responden a lógicas distintas: la primera capta toda la energía que mueve la economía (incluidos combustibles para transporte e industria), mientras la segunda se restringe a cómo se produce la electricidad (Heliyon, 2024). El glosario de la IEA refuerza estas nociones al distinguir “energía primaria”, “transformación” y



“consumo final”, y al explicar el papel del sector de transformación donde ocurren las pérdidas para convertir energía primaria en formas utilizables (electricidad, calor útil, combustibles secundarios). Comprender esa frontera es crucial para no sobrestimar el peso de ciertas fuentes o confundir emisiones de uso final con las del proceso de transformación.

Una derivación metodológica relevante es el enfoque de energía útil: en la práctica, los usuarios no demandan “energía” en abstracto sino servicios energéticos (movilidad, calor de proceso, iluminación, confort térmico). El marco de OLADE sobre energía útil busca aproximar el rendimiento real con que el consumo final se convierte en servicios, mejorando la evaluación de eficiencia y la identificación de oportunidades de ahorro. Esta perspectiva es especialmente valiosa cuando se comparan tecnologías que compiten por un mismo servicio (por ejemplo, calor industrial) con rendimientos termodinámicos muy distintos (Ey, 2025).

Más allá de la contabilidad, la literatura utiliza marcos normativos para juzgar la “calidad” de una matriz. Uno ampliamente usado es el Trilema Energético del World Energy Council, que valora simultáneamente seguridad (resiliencia ante choques y confiabilidad del suministro), equidad (accesibilidad, asequibilidad) y sostenibilidad (impactos ambientales, emisiones) (MDPI, 2023). Este marco evita evaluaciones unidimensionales —por ejemplo, centrarse solo en costo nivelado— e introduce la noción de “valor sistémico”, esto es, el aporte de cada tecnología a la confiabilidad, la flexibilidad y la reducción de emisiones del conjunto. En una región con alta hidrodependencia y creciente variabilidad climática, este enfoque es particularmente pertinente.

Desde el ángulo climático, el IPCC (AR6) sitúa el sector energético en el centro de la descarbonización: los escenarios compatibles con 1,5–2 °C requieren caídas



rápidas y profundas de las emisiones del sistema energético hacia 2050, lo que implica electrificar usos finales, mejorar eficiencias y descarbonizar la generación con portafolios que combinen renovables variables, almacenamiento y fuentes firmes bajas en carbono. A efectos comparativos, la literatura del IPCC y metaanálisis técnicos reportan que varias tecnologías hidro, eólica, solar y nuclear presentan bajas emisiones de ciclo de vida (del orden de decenas de $\text{gCO}_2\text{e/kWh}$), mientras que las fósiles sin captura se ubican en rangos centenarios de $\text{gCO}_2\text{e/kWh}$. Estas comparaciones de ciclo de vida importan porque internalizan emisiones “embebidas” en la cadena (construcción, combustibles, operación, desmantelamiento) (OBELA, 2025).

Para entender el “rol” de cada tecnología en sistemas eléctricos, conviene precisar conceptos operativos. El factor de capacidad mide qué tanto produce una planta respecto de lo que podría producir operando a plena potencia todo el tiempo; es una métrica de utilización, no de valor. Tecnologías “firmes” o despachables capaces de entregar potencia cuando se les requiere, independientemente del clima aportan adecuación (cubrir demanda pico), inercia y servicios complementarios (control de frecuencia, reservas). La literatura de sistemas eléctricos muestra que, a medida que crece la participación de renovables variables (eólica/solar), sistemas profundos en descarbonización ganan resiliencia cuando combinan dichas renovables con recursos firmes de bajas emisiones (como la nuclear, geotermia, hidro con embalse o térmicas con captura), lo que reduce el costo del sistema y la necesidad de sobredimensionar almacenamiento y redes.

La energía nuclear se considera un recurso firme y bajo en carbono, caracterizado por presentar uno de los costos nivelados de electricidad (LCOE) más bajos y por alcanzar un elevado factor de planta, medido en las horas de operación anual de las centrales nucleares. En términos físicos, la fisión de uranio libera energía con



altísima densidad energética, posibilita factores de capacidad elevados sostenidos en el tiempo, y opera con bajo uso de suelo por unidad de energía producida. En términos ambientales, evaluaciones de ciclo de vida del IPCC y metaanálisis recientes sitúan la intensidad de emisiones de la nuclear en el orden de decenas de gramos de dióxido de carbono comparables a eólica e hidro con variaciones según el enriquecimiento de uranio, el mix eléctrico usado en el ciclo del combustible y las prácticas de construcción (Dorileo et al., 2025). La IAEA, por su parte, enfatiza que la nuclear es una fuente baja en carbono y despachable, complementaria a renovables variables en estrategias de mitigación y seguridad energética.

Ahora bien, el lugar de la nuclear en la matriz no puede evaluarse solo con métricas físicas: su viabilidad depende de instituciones, financiamiento y regulación. A diferencia de las tecnologías modulares rápidas, un programa nuclear exige marcos regulatorios robustos, autoridad de seguridad independiente, capacidades de licenciamiento, gestión de ciclo de combustible y planes de gestión de residuos. La “Metodología de Hitos” de la IAEA describe tres fases secuenciales desde la decisión informada hasta la preparación y construcción que pueden tomar una década o más, y ofrece una hoja de ruta para países que contemplan introducir nuclear. En 2025, los debates sobre financiación volvieron al primer plano con el anuncio de cooperación entre la IAEA y el Banco Mundial para apoyar proyectos seguros y viables, reflejando un cambio en el apetito de las multilaterales por tecnologías capital-intensivas, pero de bajas emisiones y alta firmeza (Daboit et al., sf).

En materia de seguridad y residuos, la comunidad internacional ha desarrollado un cuerpo normativo amplio. Las Safety Standards de la IAEA y trabajos de la OECD-NEA sintetizan principios, requisitos y guías para el manejo predispositivo y el dispositivo final de residuos, incluida la disposición en repositorios geológicos



profundos (DGR), reconocida por décadas de investigación como una solución segura y eficaz para los residuos de alta actividad (Estanislau et al., 2021). Si bien el volumen total de residuos nucleares es pequeño frente a flujos tóxicos industriales, su peligrosidad exige estándares, supervisión e instituciones estables a lo largo de ciclos muy largos. A nivel de política pública, esto se traduce en la necesidad de gobernanza transparente, participación social, trazabilidad y financiamiento dedicado (fondos de desmantelamiento y de gestión de residuos).

1.1 Energía nuclear en el marco de la transición energética, desde la viabilidad normativa y organización del mercado eléctrico en Colombia

La transición energética en Colombia se ha construido durante las últimas tres décadas mediante un entramado normativo que, aunque ha impulsado de manera decidida a las energías renovables no convencionales (FNCER), no ha otorgado aún un marco habilitante para el desarrollo de la energía nuclear. Ubicar a la energía nuclear dentro de este proceso requiere comprender tres dimensiones: (i) la viabilidad normativa para su incorporación, (ii) el papel de las leyes recientes que consolidan la transición renovable, y (iii) la estructura del mercado eléctrico derivada de la Ley 143 de 1994, ley fundacional del modelo colombiano, que define las reglas para nuevos agentes y tecnologías en generación.

1.2 Viabilidad normativa de la energía nuclear en Colombia

A diferencia de Brasil, que cuenta con instituciones nucleares consolidadas desde la segunda mitad del siglo XX, Colombia carece de una ley nuclear integral que establezca competencias, autoridades regulatorias, estándares de seguridad radiológica, esquemas de licenciamiento y mecanismos de financiación para instalaciones nucleares. Esta ausencia constituye la primera barrera institucional para considerar la nuclear como parte efectiva de su transición energética.



El país opera únicamente instalaciones nucleares con fines médicos y de investigación (uDNP, IAN, centros de medicina nuclear), reguladas bajo la autoridad del Ministerio de Minas y Energía y la normatividad basada en estándares de la IAEA. Sin embargo, este marco es insuficiente para habilitar reactores de potencia, ya que la IAEA exige que los países cuenten con:

- una autoridad reguladora nuclear independiente, con funciones claras de supervisión y licenciamiento;
- un régimen de responsabilidad civil nuclear;
- un plan nacional de gestión de residuos y de combustible gastado; y
- un sistema jurídico que garantice la trazabilidad, seguridad y protección física del material nuclear.

En este punto es fundamental tener en cuenta que, en 2023–2024, se discutió en el Congreso un proyecto de ley para la creación de una Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Protección Radiológica, pero su avance ha sido limitado. Así, desde el punto de vista institucional, la nuclear en Colombia continúa en un estado de viabilidad condicionada: existe interés estratégico en su evaluación, según lo expresado en el Plan Energético Nacional 2020–2050 y los análisis de la UPME, pero sin un marco jurídico que permita avanzar más allá de la formulación de escenarios.

2. Las renovables y la transición energética en Colombia

Por otro lado, mientras la energía nuclear permanece en evaluación, el país sí ha desarrollado un marco robusto para las energías renovables no convencionales. La Ley 1715 de 2014, abrió el camino para la transición al incorporar las FNCER al Sistema Interconectado Nacional (SIN), crear incentivos tributarios (deducción de



renta, depreciación acelerada, exención de IVA y aranceles) y habilitar mecanismos de autogeneración y generación distribuida.

El despegue real, sin embargo, ocurrió durante el gobierno de 2018–2022, que impulsó las subastas de contratos de largo plazo (2019 y 2021) para solar y eólica, la ampliación de beneficios y definiciones técnicas mediante la Ley 2099 de 2021, que modernizó la Ley 1715 y el establecimiento de la transición energética como política de Estado, a través del CONPES 4075 de 2022.

A su vez, el gobierno actual, (2022–2026), ha reforzado el enfoque de transición energética desde una perspectiva de justicia territorial y descarbonización acelerada. En este periodo se destacan:

- la Política de Transición Energética Justa (2023), que prioriza renovables, almacenamiento, eficiencia energética y despliegue de hidrógeno;
- la Ley 2294 de 2023 (Plan Nacional de Desarrollo “Colombia Potencia Mundial de la Vida”), que introduce criterios de democratización energética, participación comunitaria y acceso prioritario a proyectos renovables;
- el rediseño institucional con el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Energética (propuesto) y la creación del Consejo Nacional de Transición Energética.

Sin embargo, ninguna de estas leyes o políticas incorpora explícitamente a la energía nuclear. Las renovables se han convertido en la narrativa dominante de la transición energética colombiana, mientras la nuclear permanece relegada a los estudios prospectivos. Esto muestra un vacío discursivo y normativo: aunque la nuclear es una fuente firme y baja en carbono —compatibles con los objetivos climáticos del país—, su tratamiento jurídico aún no la reconoce como parte de la transición.



3. La Ley 143 de 1994 y la organización del mercado eléctrico: implicaciones para la generación nuclear

La Ley 143 de 1994, se constituye como el pilar del funcionamiento del mercado eléctrico colombiano, establece los principios de libre competencia, separación de actividades (generación, transmisión, distribución y comercialización) y regulación independiente a cargo de la CREG. Aunque la ley no menciona explícitamente la energía nuclear, sí define el marco general al cual tendría que someterse cualquier tecnología de generación, incluida la nuclear, aquí se especifica que debería contar con:

- Acceso abierto y no discriminatorio a la red.
- Competencia entre generadores en el mercado mayorista.
- Remuneración por energía y por potencia firme, relevante para tecnologías como la nuclear con altos factores de planta.
- Exigencias en calidad, seguridad y confiabilidad que requieren reglamentos técnicos específicos.

La ley, sin embargo, no contempla una arquitectura institucional para riesgos radiológicos, licenciamiento nuclear o reservas para desmantelamiento. Por tanto, aunque la Ley 143 no impide la entrada de centrales nucleares, tampoco la habilita. Por lo que, cualquier incorporación de la nuclear requeriría:

- Una reforma legal complementaria, equivalente a una Ley Nuclear Nacional.
- Regulación técnica específica de la CREG para tarifas, licenciamiento energético, requisitos de conexión y esquemas de asignación de cargo por confiabilidad.



- Instituciones especializadas capaces de supervisar el diseño, construcción y operación de reactores.

Esto evidencia que la viabilidad técnica y económica de la nuclear en Colombia está condicionada por una viabilidad normativa insuficiente, lo que la limita al plano de la planeación estratégica (Reuters, 2025).

2. América Latina y el contexto regional de las matrices energéticas.

El mosaico energético latinoamericano comparte rasgos estructurales reconocibles y, a la vez, exhibe una heterogeneidad profunda entre subregiones. En términos de oferta primaria, la región continúa sustentándose en combustibles fósiles petróleo y derivados, gas natural y carbón, aunque con pesos relativos distintos (México y el Caribe tienden a mayor gas y derivados; el Cono Sur combina gas y grandes hidro; los Andes muestran hidro, gas y carbón). En electricidad, persiste una impronta histórica de la hidroelectricidad como columna vertebral del despacho, complementada de forma creciente por renovables no convencionales (eólica y solar) y, en tres países, por nuclear (Greenberg, 2024).

Los balances recientes construidos bajo metodologías comparables en la región refuerzan esa imagen de mezcla limpia en el sector eléctrico, pero al mismo tiempo advierten su vulnerabilidad climática ante sequías prolongadas y fenómenos de variabilidad como El Niño y La Niña. OLADE, en su Panorama 2024, sintetiza dos vectores concurrentes: avance acelerado de renovables y mayor exposición a eventos extremos que presionan la seguridad de suministro y la asequibilidad en coyunturas de estrés hídrico.

Las estadísticas más recientes sobre composición eléctrica muestran que América Latina y el Caribe generaron en 2024 alrededor de dos tercios de su electricidad a



partir de fuentes “limpias” (hidro, eólica, solar, biomasa, geotermia y nuclear), con la hidroelectricidad como bloque dominante y un empuje notable de eólica y solar en la última década. En promedio regional, la hidro se situó en torno a 41 % del total eléctrico, mientras que eólica+solar alcanzaron ~17 %, por encima del promedio mundial, lo que confirma una transición eléctrica que, aunque desigual, agrega capacidad renovable a ritmo acelerado. Este patrón, sin embargo, no elimina la sensibilidad de sistemas altamente hidros dependientes frente a periodos de caudales bajos, circunstancia que en años secos obliga a aumentar el despacho térmico (y por ende las emisiones y costos marginales), o a importar electricidad donde existen interconexiones disponibles.

El marco del Trilema Energético del World Energy Council se ha consolidado como lente analítico útil para valorar políticas y resultados energéticos en la región: seguridad (resiliencia y confiabilidad), equidad (accesibilidad y asequibilidad) y sostenibilidad (huella ambiental). El informe 2024 subraya que, tras los choques post-pandemia y las tensiones geopolíticas, la prioridad de seguridad volvió al centro de la agenda sin desplazar los objetivos de descarbonización, lo que en América Latina se traduce en reforzar generación firme baja en carbono, flexibilidad operativa, transmisión y almacenamiento, al tiempo que se expande la oferta renovable. El mismo marco sugiere que, en contextos de restricción fiscal y desigualdad, la equidad exige mecanismos de diseño tarifario, focalización de subsidios y reglas de inversión que permitan compatibilizar transición y acceso asequible.

La energía nuclear ocupa un lugar minoritario pero estratégico en la región. Solo tres países operan centrales: Argentina (Atucha I y II, Embalse), Brasil (Angra 1 y 2, con Angra 3 en construcción) y México (Laguna Verde 1 y 2). Los perfiles país de la base PRIS de la IAEA fuente primaria de referencia mundial confirman el estado

TUNJA - BOYACÁ · PBX: (608) 744 0404

Campus Centro Histórico: Cll. 19 N° 11 - 64 · Campus Avenida Universitaria:
Edificio Fray Giordano Bruno O.P.: Av. Universitaria Cll. 48 No. 1-235 este.
Edificio Santo Domingo de Guzmán: Av. Universitaria No. 45 - 202
Santoto Services: Centro Comercial Unicentro Tunja, Local 1-106



operativo de las unidades, su potencia neta y los hitos de conexión a red; además, registran los proyectos en construcción, como CAREM-25 en Argentina y Angra 3 en Brasil. En términos del Trilema, la nuclear aporta firmeza despachable y bajas emisiones de ciclo de vida, contribuyendo a la seguridad y la sostenibilidad; sus desventajas radican en altos costos de capital, plazos largos de desarrollo y exigencias institucionales para licenciamiento, seguridad y gestión de residuos, factores que condicionan su equidad (accesibilidad) (Bujaico et al., 2025).

La expansión renovable regional reciente se apalanca en instrumentos regulatorios probados subastas de largo plazo, garantías de compra, contratos por diferencia y en una reducción sustantiva de costos de solar y eólica observada a nivel global. IRENA documenta que 2023 fue un año récord de incorporaciones renovables en el mundo; en 2024 y 2025 se mantuvo el dinamismo, con la fotovoltaica como protagonista. La señal global es relevante para América Latina porque muchos países integran cadenas de suministro y financiamientos internacionales, y porque las curvas de aprendizaje se traducen en mejores LCOE y mayor bancabilidad de proyectos, aunque persisten cuellos de botella locales (permisos, consulta previa, redes y logística).

En acceso y equidad, la región ha logrado coberturas eléctricas superiores al 98 % de la población, una mejora sustantiva en dos décadas; con todo, cerca de 16 millones de personas permanecen sin acceso, concentradas en zonas rurales, amazónicas y comunidades insulares, lo que obliga a combinar interconexiones, soluciones descentralizadas y programas de energía comunitaria. El Banco Mundial y el BID coinciden en la magnitud del rezago y en la necesidad de políticas diferenciadas; experiencias recientes muestran que los sistemas solares aislados (con almacenamiento) pueden aliviar pobreza energética donde la expansión de



redes es inviable en el corto plazo, aunque la escalabilidad requiere marcos estables, financiamiento y capacidades locales (Doussoulin y Doussoulin, 2024).

Desde la economía política, la IEA caracteriza a América Latina y el Caribe como exportadora neta de crudo y carbón, pero importadora neta de gas natural y productos refinados, con una participación de biocombustibles en el transporte casi el doble del promedio mundial. Este patrón condiciona balanzas comerciales, subvenciones y señales de inversión, y explica por qué el rediseño de refinación, gasoductos y almacenamiento acompaña y a veces limita las sendas de transición. La integración regional de mercados (p. ej., SIEPAC en Centroamérica, interconexiones andinas y del Cono Sur) ofrece amortiguadores frente a shocks, pero su aprovechamiento depende de armonización regulatoria y expansión de transmisión.

La región también enfrenta desafíos socio-territoriales en la expansión de infraestructura. En Colombia, por ejemplo, la eólica de La Guajira clave para la descarbonización ha sufrido retrasos por conflictos sociales, licenciamientos complejos y brechas de red, llevando a cancelaciones o replanteamientos de proyectos por parte de grandes desarrolladores; este caso ilustra la centralidad de la licencia social, la consulta con pueblos indígenas y la coordinación interinstitucional para viabilizar inversiones. Dificultades análogas aparecen en proyectos hidroeléctricos y de transmisión en otros países andinos, lo que sugiere que el ritmo de la transición depende tanto de ingeniería y costos como de gobernanza y pactos territoriales (Salgado, 2025).

En conjunto, el estado del arte regional dibuja una transición con ventajas comparativas alto punto de partida en generación limpia gracias a la hidro, gran potencial solar y eólico, experiencia en biocombustibles y con tres cuellos de botella



recurrentes: (i) resiliencia hídrica y necesidad de recursos firmes bajos en carbono (hidro con embalse, nuclear, geotermia, almacenamiento, térmicas con captura); (ii) capacidad institucional y financiera para habilitar inversiones capital-intensivas y marcos de largo plazo; y (iii) aceptación social y calidad del relacionamiento comunitario.

El resultado práctico es que cada país avanza por trayectorias idiosincráticas: Brasil combina gran hidro, bioenergía y nuclear; Argentina integra nuclear y gas con renovables; México profundiza gas y renovables; Chile lidera en solar y eólica con gas de respaldo; Colombia inicia el despliegue de FNCER desde una base hidro-térmica y evalúa opciones firmes en su planeación. Esta diversidad reafirma que la comparación entre Brasil y Colombia eje de este artículo no debe leerse como “falta” o “exceso” de una tecnología, sino como expresión de restricciones y decisiones contextuales frente al Trilema: cada portafolio negocia, con sus propias instituciones y recursos, la tensión entre seguridad, equidad y sostenibilidad.

3. La matriz energética de Brasil: entre la hidroelectricidad, la diversificación y la apuesta nuclear

Brasil constituye uno de los casos paradigmáticos en América Latina en términos de política energética y configuración de su matriz. Con más de 200 millones de habitantes y una economía industrial y agrícola de gran escala, su demanda energética es una de las más elevadas de la región. Desde mediados del siglo XX, el país apostó de manera decidida por el aprovechamiento de sus abundantes recursos hídricos, lo que le permitió consolidar un sistema eléctrico que, en comparación con otros países emergentes, presenta un perfil bajo en emisiones de gases de efecto invernadero (Zamora, 2024).

3.1 Predominio histórico de la hidroelectricidad



La hidroelectricidad ha sido la base del sistema eléctrico brasileño durante décadas. Según el Balanço Energético Nacional 2024 (BEN), elaborado por la Empresa de Pesquisa Energética (EPE), más del 60 % de la generación eléctrica proviene de centrales hidroeléctricas, lo que convierte a Brasil en uno de los países con mayor participación de esta fuente a nivel mundial. La construcción de grandes embalses en el Amazonas y otras cuencas como Itaipú, Belo Monte y Tucuruí permitió satisfacer una creciente demanda interna y consolidar un modelo energético intensivo en hidro (de Souza y Ruffini, 2022)).

Sin embargo, este predominio también ha expuesto al sistema a riesgos considerables. Eventos de sequías prolongadas como los de 2001 y 2014, y más recientemente en 2021, redujeron drásticamente la capacidad de generación hidroeléctrica, obligando a activar plantas térmicas a gas y carbón y a importar electricidad de países vecinos. Estos episodios se tradujeron en un aumento significativo de los precios de la energía y en mayores emisiones, revelando la vulnerabilidad de un sistema excesivamente dependiente de un recurso sensible a la variabilidad climática. La experiencia llevó a replantear la política energética y a acelerar la búsqueda de una matriz más diversificada.

3.2 Estrategia de diversificación y nuevas renovables

En respuesta a dichas vulnerabilidades, Brasil implementó desde mediados de la década de 2000 políticas de diversificación energética. Además de ampliar la generación a partir de biomasa especialmente a través del bagazo de caña de azúcar, recurso abundante en el país, se promovió la inversión en energías renovables no convencionales, particularmente eólica y solar (Izquierdo y Escobar, 2024).



El éxito de esta estrategia se refleja en las cifras recientes: en 2023, Brasil superó los 32 GW de capacidad eólica instalada y más de 24 GW de solar fotovoltaica, posicionándose como líder regional en estas tecnologías. El crecimiento ha sido impulsado por subastas de energía de largo plazo, incentivos regulatorios y la reducción global de los costos de instalación de estas fuentes. Hoy, la eólica representa alrededor del 13 % de la generación total y la solar cerca del 7 %, cifras que muestran la velocidad con la que estas fuentes han ganado espacio en la matriz eléctrica.

Asimismo, la biomasa continúa siendo un componente central, con una participación cercana al 8 %, gracias a la fortaleza de la industria sucroalcoholera brasileña. Esta diversificación ha reducido la dependencia de la hidroelectricidad y ha fortalecido la resiliencia del sistema, aunque no ha eliminado los desafíos relacionados con la seguridad de suministro durante eventos climáticos extremos.

3.3 La energía nuclear en Brasil: la centralidad de Angra

Dentro de esta estrategia, la energía nuclear ocupa un lugar singular. Brasil es, junto con Argentina y México, uno de los tres países latinoamericanos con centrales nucleares en operación. La Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA), ubicada en Angra dos Reis, concentra las tres unidades planificadas: Angra 1, en operación desde 1985 con una capacidad de 657 MW; Angra 2, inaugurada en 2001 con 1.350 MW; y Angra 3, en construcción desde 1984 y con un avance significativo, aunque interrumpida en varias ocasiones por problemas financieros, controversias regulatorias y cuestiones de gobernanza (Pinto y Da Silva, 2021).

Según la base de datos PRIS de la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA), Angra 1 y Angra 2 generan en conjunto cerca de 15 TWh anuales, equivalentes a aproximadamente 2,5 % a 3 % de la generación eléctrica de Brasil.



Aunque esta participación pueda parecer marginal en términos porcentuales, su valor estratégico es notable: se trata de generación firme, continua y de bajas emisiones, que contribuye a estabilizar el sistema en momentos de escasez hídrica o de alta variabilidad de las renovables.

3.4 Planeación a largo plazo y potencial de expansión

El Plano Decenal de Expansão de Energia 2034 (PDE 2034), elaborado por la EPE y el Ministerio de Minas y Energía (MME), reconoce explícitamente el papel de la energía nuclear en la seguridad y sostenibilidad del sistema brasileño. El documento plantea la culminación de Angra 3 como prioridad y abre la discusión sobre nuevas tecnologías como los reactores modulares pequeños (SMR), que podrían ser desplegados en regiones aisladas o en polos industriales con alta demanda energética.

La literatura académica, representada por autores como Tolmasquim (2022), enfatiza que el verdadero valor de la nuclear en Brasil no se mide solo en su participación actual, sino en su potencial de expansión en un contexto de transición energética global. Su capacidad de proporcionar energía base estable, combinada con el despliegue de renovables variables, puede garantizar la resiliencia del sistema frente a sequías y picos de demanda, al tiempo que contribuye al cumplimiento de las metas climáticas de neutralidad de carbono.

3.5 Retos y debates en torno a la energía nuclear

No obstante, la nuclear en Brasil enfrenta retos significativos. El primero es de orden financiero: los costos de construcción de Angra 3 han superado reiteradamente las estimaciones iniciales, generando debates sobre su viabilidad económica. El segundo es institucional y de aceptación social, pues la población brasileña ha



mostrado posturas ambivalentes hacia la energía nuclear, especialmente después de accidentes internacionales como Fukushima en 2011. A ello se suma la necesidad de consolidar una autoridad reguladora independiente y fortalecer los programas de gestión de residuos radiactivos.

A pesar de estas dificultades, la inclusión de la nuclear en la política energética brasileña se entiende como parte de un esfuerzo más amplio de equilibrio: garantizar seguridad de suministro, mantener bajas emisiones y reducir la dependencia de la hidroelectricidad. En este sentido, Brasil se destaca como el único país sudamericano que combina un sistema hidroeléctrico de gran escala con un programa nuclear activo, lo que lo convierte en un laboratorio de transición energética para el continente.

4. La matriz energética de Colombia: hidro dependencia, renovables en ascenso y la nuclear como posibilidad

Colombia comparte con Brasil la riqueza en recursos hídricos, lo que históricamente ha determinado la estructura de su sistema eléctrico. Desde mediados del siglo XX, la construcción de grandes embalses como Betania, Chivor, El Quimbo y San Carlos permitió consolidar un modelo fuertemente basado en la hidroelectricidad, que hoy representa entre 65 % y 70 % de la generación eléctrica nacional. Este perfil ha convertido al país en uno de los más limpios de América Latina en términos de emisiones de carbono por kWh generado, pero a la vez lo ha vuelto altamente vulnerable a la variabilidad climática, en particular al fenómeno de El Niño, que reduce los caudales y disminuye la capacidad de generación de los embalses (Daza, 2023).

4.1 Hidrodependencia y vulnerabilidades estructurales



El hito más recordado de esta fragilidad ocurrió en 1992, cuando una fuerte sequía asociada a El Niño llevó a un déficit de generación tan crítico que el país debió enfrentar apagones programados durante varios meses. Este episodio evidenció que la seguridad energética de Colombia no podía depender casi exclusivamente de un solo recurso y marcó el inicio de un debate sobre la necesidad de diversificar la matriz. A pesar de las lecciones aprendidas, la dependencia hidroeléctrica se mantiene elevada: en 2023, según XM (operador del Sistema Interconectado Nacional), el 66 % de la generación siguió siendo hidráulica. La recurrencia de fenómenos de El Niño, como los de 1997-1998, 2015-2016 y 2023-2024, confirma que el riesgo climático es estructural y persistente.

En estos episodios, el país recurre al despacho térmico (carbón, gas natural y en menor medida líquidos), que representa alrededor del 30 % de la capacidad instalada. Si bien esta capacidad térmica ha sido suficiente para suplir la demanda en emergencias, implica altos costos y un incremento de las emisiones. Además, la disponibilidad de gas natural depende de una oferta doméstica limitada y cada vez más complementada con importaciones de GNL, lo que añade un factor de vulnerabilidad.

4.2 Renovables en ascenso: políticas, avances y limitaciones

En los últimos años, Colombia ha empezado a transformar su modelo con la incorporación de energías renovables no convencionales (FNCR), principalmente solar y eólica. La Ley 1715 de 2014 y la Ley 2099 de 2021 sentaron las bases jurídicas para fomentar la inversión en estas fuentes, otorgando incentivos tributarios y mecanismos de financiamiento. Posteriormente, el Gobierno nacional, a través del Ministerio de Minas y Energía y la UPME, implementó subastas de largo



plazo en 2019 y 2021, que adjudicaron proyectos eólicos en La Guajira y solares en departamentos como Cesar, Tolima y Valle del Cauca.

Los resultados han sido notables en términos de crecimiento porcentual: la capacidad solar pasó de menos de 100 MW en 2018 a más de 1.5 GW en 2024, mientras que la eólica alcanzó los 500 MW, con perspectivas de superar los 2 GW hacia 2030. Sin embargo, en el agregado nacional, estas cifras representan aún menos del 5 % de la generación eléctrica, lo que revela que el cambio estructural apenas comienza.

Los retos principales son tecnológicos, sociales y financieros. Desde el punto de vista técnico, la infraestructura de transmisión no está preparada para evacuar toda la energía generada en regiones como La Guajira, donde se concentran los mejores vientos del país. En el plano social, las comunidades indígenas wayuu han cuestionado la falta de consulta previa y el impacto cultural de los parques eólicos, generando conflictos que retrasan la entrada en operación de proyectos clave. En el ámbito financiero, la incertidumbre regulatoria y la limitada experiencia bancaria en proyectos renovables han dificultado el acceso a capital a gran escala. Estos factores muestran que, aunque la transición está en marcha, aún persisten barreras para que las renovables logren un peso significativo en la matriz colombiana.

4.3 La energía nuclear como posibilidad de largo plazo

A diferencia de Brasil, Colombia no cuenta con centrales nucleares en operación ni proyectos de construcción activos. No obstante, el debate sobre la opción nuclear ha estado presente en la planeación de largo plazo. El Plan Energético Nacional 2020–2050 (PEN), elaborado por la UPME, incluye la energía nuclear entre las tecnologías que podrían complementar la diversificación futura del sistema, junto con la geotermia y la captura y almacenamiento de carbono.



El PEN plantea que la adopción de nuclear en Colombia implicaría un proceso institucional de al menos 15 a 20 años, que debería iniciar con la formación de capital humano especializado, el establecimiento de una autoridad reguladora nuclear independiente, la definición de un marco legal y de seguridad radiológica, y la preparación de un plan de gestión de residuos radiactivos. Adicionalmente, debería evaluarse la viabilidad financiera, considerando que los costos de construcción de plantas nucleares oscilan entre 6 y 9 mil millones de dólares para reactores de gran escala, cifra que supera la capacidad de inversión del sector eléctrico colombiano bajo el esquema actual de mercado.

En el contexto global, la discusión colombiana se conecta con el interés creciente en tecnologías como los reactores modulares pequeños (SMR), que prometen menores costos iniciales, mayor flexibilidad y aplicaciones en sistemas aislados o industriales. Sin embargo, la adopción de estas tecnologías requeriría una estrategia de Estado de largo aliento, con cooperación internacional (IAEA, Banco Mundial, BID) y alianzas tecnológicas.

4.4 Balance y desafíos futuros

En síntesis, la matriz energética de Colombia se caracteriza por su limpieza relativa debido al peso de la hidroelectricidad, pero también por su alta exposición climática. Los avances en renovables no convencionales representan un paso hacia la diversificación, aunque todavía insuficiente para reducir la vulnerabilidad estructural del sistema. La opción nuclear aparece en la planeación como una posibilidad de futuro más que como una realidad inmediata, condicionada por factores financieros, institucionales y sociales.

El desafío de Colombia será encontrar un equilibrio entre seguridad de suministro, sostenibilidad y equidad, en línea con el marco del Trilema Energético. Para ello,



deberá avanzar simultáneamente en: i) consolidar un mercado atractivo para renovables y almacenamiento, ii) fortalecer la infraestructura de transmisión y la gobernanza social de proyectos, iii) garantizar respaldo térmico con menores emisiones, y iv) definir con claridad si la energía nuclear tendrá un rol en su futuro energético o seguirá siendo solo una alternativa proyectada en documentos de planificación.

5. Discusión comparativa: convergencias y divergencias

Comparar a Brasil y Colombia exige partir de un rasgo estructural común: ambos países han construido sistemas eléctricos con una base hidroeléctrica dominante, lo que explica su intensidad relativamente baja de emisiones por kWh. En 2023, la hidroelectricidad aportó en torno al 60 % de la generación de Brasil y ~65 % en Colombia; sin embargo, esa fortaleza climática conlleva una vulnerabilidad compartida: la exposición a sequías y a la variabilidad hidro climática (p. ej., El Niño), que tensiona precios y confiabilidad cuando los embalses caen por debajo de promedios históricos. En Colombia, XM registró en 2024 aportes hídricos entre los más bajos en 40 años; Brasil, por su parte, ha debido reducir el uso hidro en la Amazonia y complementar con térmicas e importaciones en episodios secos. Estas evidencias sitúan a ambos casos ante el mismo dilema: diversificar con fuentes firmes y flexibles que refuercen la seguridad de suministro sin renunciar a la descarbonización.

A nivel de principios de política, el marco del Trilema Energético (seguridad, equidad y sostenibilidad) ayuda a entender decisiones divergentes ante un riesgo similar. En los dos países, la prioridad de seguridad ha ganado peso tras los choques recientes (climáticos y de precios), sin desplazar metas de emisiones; la tensión se resuelve de modo distinto por su tamaño de mercado, capacidades institucionales y



restricciones fiscales. Brasil internaliza la necesidad de recursos firmes bajos en carbono (hidro con embalse, biomasa, nuclear) en su planeación; Colombia, aunque reconoce el riesgo hídrico, confía todavía en respaldo térmico y en una incorporación gradual de renovables no convencionales y almacenamiento, con la opción nuclear en evaluación de largo plazo.

La nuclear es el punto de quiebre más notorio. Brasil opera Angra 1 y Angra 2 y en 2024 la nuclear aportó 14.996 GWh, equivalentes a ~2,3 % de la electricidad del país; su valor no radica en el porcentaje sino en la firmeza despachable con bajas emisiones que ofrece durante sequías prolongadas. La culminación de Angra 3 continúa en debate: en 2025 el gobierno y Eletrobras reordenaron responsabilidades y la empresa privatizada dejó de estar obligada a financiar la obra, mientras Eletronuclear sostuvo que podría completarla con nueva estructura financiera; el CNPE ha pospuesto decisiones finales mientras se recalibran costos y esquemas de financiamiento. En Colombia, por contraste, no hay generación nuclear ni proyectos en construcción; el PEN 2020–2050 mantiene la nuclear como opción a evaluar, lo que implicaría un programa institucional de largo aliento (regulador independiente, formación de capacidades, gestión de residuos) antes de cualquier decisión de inversión.

La trayectoria renovable también difiere. Brasil ha escalado eólica y solar hasta situarlas en torno a una cuarta parte de su generación reciente, combinando subastas, redes robustas y un mercado con profundidad financiera; de hecho, el país aparece entre los líderes mundiales en participación eléctrica “limpia”. Colombia, en cambio, ha avanzado más lentamente: aunque adjudicó proyectos eólicos y solares en 2019–2021, los cuellos de transmisión en el norte y los conflictos socio-territoriales especialmente en La Guajira ralentizaron la entrada en operación, con salidas de desarrolladores y replanteos de cartera. La consecuencia



práctica es que la resiliencia colombiana ante Niños fuertes depende todavía más del binomio hidro-térmico, mientras la diversificación renovable llega con rezagos respecto de los cronogramas oficiales.

Otra divergencia aparece al mirar la matriz energética (oferta primaria) no solo la eléctrica: Brasil integra una bioeconomía madura (etanol y biodiésel) que eleva la participación renovable en su energía total y reduce la presión sobre derivados de petróleo en transporte; en 2024 la EPE destacó que la oferta brasileña alcanzó ~50 % de renovabilidad, apoyada en hidro y biomasa de caña. Colombia mantiene una oferta primaria más intensiva en fósiles (carbón y petróleo), con biocombustibles de menor escala. Esta estructura condiciona incentivos, balanza externa y el tiempo de maduración de tecnologías firmes bajas en carbono distintas de la hidro.

En institucionalidad y financiamiento, Brasil cuenta con un aparato sectorial grande y especializado (MME, EPE, ONS, Eletronuclear) y con un mercado de capitales capaz de estructurar proyectos intensivos en CAPEX, aunque Angra 3 exhibe los desafíos de costos, gobernanza y riesgos país. Colombia posee instituciones técnicas sólidas (UPME, CREG, XM), pero la capacidad de balancear simultáneamente expansión de redes, almacenamiento a gran escala y eventuales tecnologías firmes de alto CAPEX es más limitada; por eso, el PEN condiciona la nuclear a un proceso de Estado, gradual y con cooperación internacional, en lugar de verla como expansión inmediata. Estas diferencias explican por qué, ante igual riesgo hídrico, Brasil internaliza nuclear dentro del portafolio, mientras Colombia prioriza por ahora FNCER, gestión de la demanda y respaldo térmico, dejando la nuclear en evaluación estratégica.

En suma, la convergencia central alta hidrodependencia y exposición climática convive con divergencias decisivas: (i) presencia efectiva de nuclear en Brasil frente



a su ausencia en Colombia; (ii) escala y profundidad de redes y mercados para integrar renovables; (iii) peso de bioenergía en la matriz primaria brasileña; y (iv) marcos institucionales y capacidad fiscal para asumir proyectos de alto CAPEX y largos plazos. A la luz del Trilema, la estrategia brasileña privilegia seguridad y sostenibilidad con un mix de hidro, eólica/solar, bioenergía y nuclear; la colombiana busca sostener sostenibilidad con hidro y FNCER, mientras gestiona la seguridad mediante térmicas y almacenamiento, y mantiene abierta pero no comprometida la vía nuclear. Estas rutas no son estáticas: nuevas sequías, precios de combustibles, avances en almacenamiento y reformas regulatorias podrían acercar o alejar las trayectorias. Lo que sí muestra la evidencia es que, en matrices hidro-dependientes, algún bloque firme bajo en carbono (nuclear, geotermia, hidro con embalse, o térmicas con captura) tiende a mejorar resiliencia y reducir costos del sistema cuando crecen eólica y solar; Brasil ya explora esa vía con nuclear, mientras Colombia la discute aún en el plano de la planificación.

5.1 Análisis conductual de las decisiones en torno a la energía nuclear en Brasil y Colombia

El despliegue de la energía nuclear en Brasil y su ausencia en Colombia no puede comprenderse solo desde las variables técnicas o económicas; también obedece a un comportamiento colectivo y político que refleja percepciones de riesgo, niveles de confianza institucional y patrones de toma de decisiones a nivel gubernamental y social.

En Brasil, el comportamiento estatal y social frente a la nuclear ha estado marcado por una conducta de resiliencia y pragmatismo. Ante crisis hidroeléctricas recurrentes, las élites políticas y técnicas asumieron que diversificar con una fuente firme y de baja huella de carbono era estratégico, aun con costos financieros



elevados. Este patrón de decisión se asocia a lo que la psicología conductual denomina “aversión a la escasez”: la experiencia de apagones y de vulnerabilidad energética generó una presión que llevó a valorar la seguridad de suministro por encima del rechazo a los riesgos percibidos de la nuclear. Aunque existe ambivalencia social; agravada tras Chernóbil y Fukushima, la narrativa institucional brasileña ha reforzado la idea de que la nuclear es necesaria para estabilizar la matriz y acompañar el crecimiento económico, generando un comportamiento de aceptación condicionada.

Colombia, por su parte, muestra un comportamiento de postergación y cautela. Aunque enfrenta riesgos similares de hidrodependencia, la ausencia de una experiencia previa con plantas nucleares y la percepción de altos costos han conducido a un patrón de “sesgo de statu quo”, en el que las decisiones tienden a favorecer lo conocido (hidro y térmico) y a aplazar innovaciones disruptivas. A nivel social, existe una aversión al riesgo nuclear asociada a imaginarios de catástrofe, que se intensifica por la falta de una cultura de confianza en instituciones regulatorias fuertes en esta materia. Conductualmente, los decisores colombianos se orientan hacia estrategias de bajo compromiso, enfocadas en explorar la nuclear en planes de largo plazo, pero sin asumir los costos políticos y financieros inmediatos de introducirla.

Conclusiones

El análisis comparativo de las matrices energéticas de Brasil y Colombia permite extraer varias conclusiones de relevancia académica y práctica. En primer lugar, ambos países comparten una característica estructural común: la alta participación de la hidroelectricidad, lo que ha permitido que sus sistemas eléctricos sean relativamente limpios en comparación con otras economías de similar tamaño. Esta



fortaleza, sin embargo, constituye al mismo tiempo una debilidad estructural, pues los hace vulnerables a la variabilidad hidrológica y, en particular, a los fenómenos de El Niño que reducen los caudales y comprometen la seguridad de suministro.

En segundo lugar, las trayectorias de diversificación muestran una clara divergencia. Brasil, a partir de sus crisis hídricas, adoptó una estrategia integral que combina la expansión de la bioenergía, la masificación de la solar y la eólica y la incorporación activa de la energía nuclear. Colombia, en contraste, ha avanzado en la incorporación de renovables no convencionales mediante subastas y marcos regulatorios favorables, pero aún con una participación reducida, lo que mantiene su dependencia del binomio hidro-térmico. La nuclear en este país se mantiene como una opción en el plano de la planificación, sin un compromiso político o institucional que la proyecte a corto o mediano plazo.

Un hallazgo clave es que la energía nuclear constituye el punto de mayor divergencia. Mientras Brasil ha desarrollado desde los años setenta una infraestructura institucional y técnica que le ha permitido operar dos reactores (Angra 1 y 2) y proyectar un tercero (Angra 3), Colombia carece de experiencia práctica y de un consenso político y social sobre su pertinencia. Este contraste ilustra que la adopción de la nuclear no depende solo de los recursos técnicos o geológicos, sino de factores institucionales, económicos y sociales, tal como lo advierten Sovacool y Griffiths (2020).

Las implicaciones de estos hallazgos son múltiples. Para Brasil, la consolidación de la energía nuclear y el impulso renovable refuerzan su papel como líder regional en transición energética, aunque debe resolver los problemas de financiamiento y gobernanza que persisten en proyectos como Angra 3. Para Colombia, la principal implicación es la urgencia de acelerar la diversificación con renovables no



convencionales y almacenamiento, al tiempo que evalúa con realismo la viabilidad económica, institucional y social de la energía nuclear como alternativa de largo plazo. Ambos países, en suma, deben encontrar mecanismos para equilibrar seguridad, sostenibilidad y equidad, en línea con el marco del Trilema Energético.

En cuanto a lagunas de conocimiento, persisten varias. A nivel regional, aún es escasa la investigación comparada que mida de manera integrada el valor sistémico de la nuclear frente a otras fuentes firmes de bajas emisiones (como geotermia, hidro con embalse o térmicas con captura de carbono). También falta evidencia sobre los impactos sociales y territoriales de la transición, especialmente en proyectos renovables de gran escala, que en Colombia han enfrentado oposición comunitaria. Asimismo, el debate sobre los costos de ciclo de vida y los beneficios de resiliencia de la nuclear en sistemas hidro dependientes de América Latina está apenas en construcción, lo que abre un campo de investigación interdisciplinario entre economía, política energética y estudios climáticos.

De este modo, como direcciones para futuras investigaciones, este estudio sugiere: (i) profundizar en análisis de escenarios comparativos que incluyan modelos de resiliencia climática de los sistemas eléctricos de Brasil y Colombia; (ii) evaluar con mayor precisión el potencial de los reactores modulares pequeños (SMR) en países con limitaciones fiscales y territoriales como Colombia; (iii) estudiar las dinámicas de gobernanza y aceptación social de la nuclear en América Latina, a partir de experiencias como la argentina y la brasileña; y (iv) ampliar el análisis hacia una perspectiva regional, explorando cómo la cooperación energética latinoamericana podría integrar de manera complementaria la nuclear, las renovables y las interconexiones transfronterizas.



En relación, el trabajo demuestra que, aunque Brasil y Colombia enfrentan desafíos comunes, sus respuestas son diferentes: Brasil ha decidido incluir a la energía nuclear como pieza estratégica de su matriz, mientras Colombia la mantiene como posibilidad futura. Este contraste ofrece una valiosa oportunidad para comprender cómo las condiciones políticas, institucionales y económicas influyen en la configuración de las matrices energéticas y en la viabilidad de las opciones tecnológicas disponibles en el marco de la transición energética global.

Referencias

Agencia Internacional de Energía (IEA). (2023). *Brazil: Energy profile*. París: IEA.

Agencia Internacional de Energía (IEA). (2023). *Colombia energy profile*. París: IEA.

Agencia Internacional de Energía (IEA). (2023). *Latin America energy outlook 2023*. París: IEA.

Agencia Internacional de Energía (IEA). (2017). *Understanding and using the energy balance*. París: IEA.

Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA). (2021). *Milestones in the development of a national infrastructure for nuclear power (NG-G-3.1, Rev. 1)*. Viena: IAEA.

Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA). (2022). *Climate change and nuclear power 2022*. Viena: IAEA.



Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA). (2024). *Milestones in the development of a national infrastructure for nuclear power* (NG-G-3.1, Rev. 1, actualización). Viena: IAEA.

Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA). (2024). *Power Reactor Information System (PRIS): Brazil – Angra 1 y Angra 2*. Viena: IAEA.

Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA – PRIS). (2024). *Country profiles: Brasil, Argentina, México*. Viena: IAEA.

Araújo, D. F. C. de. (2023). *The dynamics of renewable energies in the Brazilian energy matrix in the 21st century*. *Revista Cerrados (Unimontes)*, 21(1), 399–429. DOI: 10.46551/rc24482692202316

Asturias, J., & Arias, A. (2016). Impacto de la matriz energética en el desarrollo sostenible de América Latina y el Caribe. *Desarrollo sostenible y matriz energética en América Latina: la universalización del acceso a la energía limpia*, 123-148.

Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2022). *El futuro energético de Colombia: retos y oportunidades*. Washington, D.C.: BID.

Banco Mundial / BID. (2023). *Acceso a la electricidad en ALC*. World Bank Open Data.

Bujaico, SKM, Huamani, EEB, Bujaico, MM, Ventura, DC, Artica, WMM y Taipe, JQ (2025). Análisis de la Matriz Energética y su transición hacia un Desarrollo Sostenible en América Latina. *Revista de Investigación Científica y Tecnológica Industrial*, 6 (1), 40-47.

Daboit Roberto, T. C. A., Martins, M. C., & Almeida, A. P. de. (s.f.). *La energía nuclear en el contexto de la matriz energética brasileña*. Atena Editora.



- Daza Vargas, M. A. (2023). Los proyectos hidroeléctricos y su aporte la matriz de generación de energía en Colombia.
- de Souza, C. M., & Ruffini, M. (2022). Dictadura, poder estatal y grandes proyectos en regiones marginales. La Amazonia Brasileña y la Patagonia Argentina durante la década de 1960 y 1970. *Folia Histórica del Nordeste*, (43), 81-106.
- Doussoulin, JP y Doussoulin, E. (2024). El papel geopolítico del sector energético en el desarrollo de América Latina: un análisis utilizando la teoría de los sistemas mundiales de Wallerstein. *Revista Economía, Gestión y Territorio*, 1 (1), 34-63.
- Dorileo, I. L., Bassi, W., & de Souza, D. F. (2025). *Nuclear power plants as equivalents of hydroelectric reservoirs and providers of grid stability: The case of the Brazilian electrical system*. *Energies*, 18(14), 3642
- Estanislau, F. B. G. L., Costa, A. L., Velasquez, C. E., & Pereira, C. (2021). *Integrated analysis of the Brazilian nuclear energy system*. *International Journal of Energy Research*, 45(8), 11526–11537
- EY (2025). *Transición energética en Latinoamérica: Colombia, México y Perú*. Informe en *Revista EXECUTION*.
- Greenberg Traurig LLP. (2024, diciembre). *Latin America Energy Updates: September and October 2024*. Greenberg Traurig LLP Insights.
- Heliyon. (2024). *A comparative analysis of electricity generation in Latin America and the Caribbean using multivariate techniques*. *Heliyon*.
- Izquierdo-Socola, I. A., & Escobar-García, M. C. (2024). La Integración de las Estrategias Empresariales en la Administración de Energías Renovables en Latinoamérica. *MQRInvestigar*, 8(3), 4964-4992.
- Izzo, G. (2017). *Perspectiva de la energía nuclear en la futura matriz energética* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de La Plata).



- MDPI. (2023). *A Comprehensive Quadrilemma Index of Renewable Energy: The Latin American Case*. *Energies*, 18(15), 3912.
- OBELA. (2025). *América Latina y el cambio de matriz energética*. *Observatorio Económico Latinoamericano*.
- Ocampo, P. C., León, J., & Blekhman, D. (2023). *Context Good Practices in Energy Matrix Focused Towards a Hydrogen Economy: Colombia Becoming the Colossus of the Hydrogen Economy and Sustainability in the Region*. En *Handbook of Research on Sustainable Consumption and Production for Greener Economies*, IGI Global.
- Pinto, G. B., & Da silva, J. C. (2021). Sostenibilidad energética: el potencial de transición nuclear brasileño y el transconstitucionalismo uruguayo. *Revista de Derecho*, 20(39), 53-73.
- Reuters. (2025, 18 de febrero). *Brazil's government split over multi-billion dollar nuclear plant completion*. Reuters.
- Salgado Vila, CM (2025). *Transición energética global: Análisis de enfoques, políticas y estrategias hacia una matriz energética sostenible y justa* (Tesis doctoral, Universidad del Desarrollo. Facultad de Ingeniería).
- Ugarteche, O., & Hernández, J. G. (2023). *Energy Matrix Transformation in Latin America: The Global Political Economy of Chinese Investments*. En L. L. B. Lazaro & E. Serrani (Eds.), *Energy Transitions in Latin America* (serie Sustainable Development Goals, cap. 4). Springer.
- World Economic Forum. (2024). *How Brazil and Chile are leading Latin America's energy transition*. *WEF Agenda* (blog).
- World Nuclear Association. (2025, 3 de junio). *Nuclear power in Brazil*. World Nuclear Association.





SANTOTOTUNJA.EDU.CO
NIT. 860.012.357-6



Zamora, Á. O. D. (2024). *La amenaza de la transición eléctrica en América Latina: procesos históricos, ideas-fuerza, conflictos y alternativas* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Querétaro).



TUNJA - BOYACÁ · PBX: (608) 744 0404

Campus Centro Histórico: Cll. 19 N° 11 - 64 · Campus Avenida Universitaria:
Edificio Fray Giordano Bruno O.P.: Av. Universitaria Cll. 48 No. 1-235 este.
Edificio Santo Domingo de Guzmán: Av. Universitaria No. 45 - 202
Santoto Services: Centro Comercial Unicentro Tunja, Local 1-106

