

ANÁLISIS DE LA CADENA PRODUCTIVA PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA
NUCLEAR Y SU COMPARACIÓN CON EL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LOS
HIDROCARBUROS

Iván Andrés Agudelo Arroyabe y Juan José Celis Sánchez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero de Petróleo

Director

Diego Armando Vargas Silva

Ingeniero de Petróleo

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicoquímicas

Escuela de Petróleos

Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A mi amada familia, mi roca y mi refugio, fuente inagotable de amor. A ustedes, mi ejemplo de vida, dedico este trabajo. Gracias por enseñarme el valor de la humildad en cada paso y por su espíritu trabajador incansable, que me inspiró a perseverar. Por ser una familia profundamente unida, su fe en mí y el sacrificio silencioso que hicieron me permitieron llegar hasta aquí. Este logro es la prueba de que su apoyo y amor incondicional son el motor más poderoso en mi vida.

A mi madre Sol María, que con su amor, paciencia y comprensión logró ayudarme en todo lo que necesitaba, a ella muy agradecido siempre, por todo lo que me ha brindado y espero poder retribuirle eso algún día, este triunfo también es tuyo, madre amada.

A mi hermana Luisa Fernanda, por ser mi guía, ejemplo de perseverancia, por ser incondicionalmente mi apoyo y por pasar varias noches junto a mí haciéndome reír y disfrutar de los momentos.

A mi tía Luz Marina y tío Hernán que me brindaron ese apoyo y me acogieron en la ciudad de Barrancabermeja brindándome todo ese amor, cariño, respeto y dándome esos valores para seguir formando como gran persona los quiero mucho y siempre estaré agradecido de ustedes.

A mis amigos, en quienes siempre encontraba alegría y un mensaje de aliento cada vez que lo necesité y los que se convirtieron en familia.

A mi perro Benji por su compañía inigualable en momentos de angustia.

Iván Andrés Agudelo, Juan José Celis

Dedicatoria

A todos aquellos que han sido pilares fundamentales en mi vida, y sin cuyo apoyo, amor y fe incondicional este logro no habría sido posible. A mi madre, Ana Milena, por ser mi todo. Mi primer amor, mi refugio seguro y la fuerza motriz que ha impulsado cada uno de mis pasos. Gracias por tu amor incondicional, tus sacrificios que pavimentaron mi camino, y por enseñarme que la perseverancia es la clave para alcanzar lo imposible. Eres la razón por la que nunca me he rendido. Este título es también tuyo, mamá.

A mi padrastro, Michael, que descanse en paz. Con un profundo respeto y agradecimiento. Por darme el estudio y la sabiduría; no solo con recursos, sino con el invaluable ejemplo de que el conocimiento es la mayor herramienta para transformar la vida. Gracias por tu guía, por creer en mi potencial y por ser una figura paterna que me inspiró a buscar la excelencia académica.

A mi prometida, Anyela, mi amor y compañera de vida. Por su amor incondicional y desinteresado, gracias por ser mi ancla en los momentos de incertidumbre y mi guía en este camino, por cada sacrificio que hiciste, por inspirarme a ser mejor profesional y persona, por la alegría que traes a mi vida. Eres mi compañera, mi confidente y el futuro que anhelo construir. Con todo mi amor y gratitud, este logro es también tuyo.

A mi padre, René, gracias por la disciplina y los valores que cimentaron mi carácter. Tu guía y tus enseñanzas han sido fundamentales para entender la importancia del esfuerzo y la dedicación en la vida profesional. A Rocío y familia. Por su generosidad y el cariño que me brindaron. A mis abuelos. A mis venerables abuelos, por su legado de sabiduría, bondad y humildad.

Iván Andrés Agudelo, Juan José Celis

Agradecimiento

Queremos expresar nuestro profundo agradecimiento a la *Universidad Industrial de Santander (UIS)* y al Grupo de investigación de Estabilidad de Pozo por su apoyo y el servicio de prestarnos el salón para reunirnos y facilitar el desarrollo del trabajo de manera acorde con los equipos que tienen en el salón.

A la *Ph.D. Zuly Himelda Calderón Carrillo*, por ser nuestra primera directora y darnos la idea de la tesis, asimismo, por acompañarnos en esos inicios del desarrollo del trabajo, también por la confianza depositada que fue esencial al principio para cada paso que vino después en la realización de la tesis.

Al *Ing. Diego Armando Vargas Silva*, Que gracias al él pudimos seguir con el desarrollo de la tesis, convirtiéndose en nuestro nuevo director y apoyarnos en lo que necesitábamos, también por su empeño y entusiasmo durante la realización del proyecto, apreciamos su paciencia y compromiso que nos ayudaron en concluir de manera satisfactoria con esta investigación

Tabla de Contenido

	<i>Pág.</i>
Introducción	14
1. Objetivos.....	16
1.1. Objetivo General	16
1.2. Objetivos Específicos.....	16
2. Fundamentos teóricos y estado del arte	17
2.1. Marco de referencia	17
2.1.1. Contextualización de Energía Nuclear y de los Hidrocarburos	17
2.1.2. Proyección de la Energía Nuclear y de los Hidrocarburos en Colombia y el mundo.....	18
2.1.3. Proyectos a futuro de la Energía Nuclear y de los Hidrocarburos en Colombia y el mundo	21
3. Revisión de las generalidades para la generación de energía nuclear y su comparación con los hidrocarburos.....	23
3.1. Desarrollo de los aspectos generales de la generación de energía	23
3.1.1. Radioactividad.....	23
3.1.2. Elementos radioactivos	25
3.1.3. Radioactividad inducida	27
3.1.4. Forma de obtener la energía nuclear.....	28
3.1.5. Reactores Nucleares	31
3.2. Material escindible (material para fisión nuclear).....	31

3.3. Moderador (Regular la energía de los neutrones)	32
3.4. Refrigerante y transportador de calor	32
3.5. Tipos de reactores	33
3.5.1. Reactores con moderador de grafito:	33
3.5.2. Reactores Heterogéneos con moderador de Agua (PWR, BWR).....	33
3.5.3. Reactores homogéneos	33
3.5.4. Reactores modulares pequeños (SMR).....	33
3.6. Tecnologías y uso de la energía de los combustibles fósiles.....	34
4. Identificar las variables que intervienen en la generación de energía eléctrica a partir de energía nuclear y los hidrocarburos. (Reserva, demanda y producción).	39
5. Definición del impacto ambiental que genera el uso de energía nuclear y su comparación con los hidrocarburos	48
5.1. Impacto Ambiental de la energía nuclear.....	48
5.2. Ciclo de vida de la energía nuclear	49
5.3. Impacto ambiental de los hidrocarburos.....	50
5.4. Ciclo de vida de los hidrocarburos	51
5.5. Comparativa ambiental entre la energía nuclear e hidrocarburos	53
5.6. Generación y gestión de residuos.....	53
5.7. Normas para el uso de la energía nuclear en Colombia	54
5.8. Licenciamiento.....	55

5.9. Gestión de residuos	55
5.10. Aceptación publica	55
5.11. Competitividad	56
6. Comparación del potencial energético de la generación de energía eléctrica a partir de la energía de los hidrocarburos y la energía nuclear.....	57
6.1. Hidrocarburos	57
6.2. Energía nuclear.....	58
6.3. Costos de generación eléctrica	59
6.4. Costos de capital (CAPEX).....	60
6.5. Costos de operación y mantenimiento (O&M)	61
6.5.1. Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y contaminación atmosférica	62
6.6. Indicadores económicos fundamentales de la energía nuclear.....	64
6.7. Valores de referencia para proyectos nucleares	64
Conclusiones.....	67
Recomendaciones	69
Referencias Bibliográficas	70

Lista de Tablas

	<i>Pág.</i>
Tabla 1. Características comparativas de la energía nuclear y los hidrocarburos.....	35
Tabla 2. Comparación de emisiones de CO2 por energía.....	53
Tabla 3. Comparativa de residuos generados.....	54
Tabla 4. Resumen de aspectos comparativos de las dos energías	65

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema de una central eléctrica	36
Figura 2. <i>Proceso de ciclo combinado gas-vapor</i>	37
Figura 3. <i>Pronóstico de demanda 2022-2026 vs oferta 2022-2031</i>	42
Figura 4. <i>Reservas probadas de petróleo</i>	43
Figura 5. <i>Reservas probadas de gas</i>	44
Figura 6. <i>Proyectos de oferta y demanda de uranio y escenarios de referencia</i>	45
Figura 7. <i>Producción de uranio (miles de toneladas) en lugares clave a nivel mundial</i>	47
Figura 8. <i>Evolución de emisiones del módulo de energía (1990-2021)</i>	52

Glosario

Fisión nuclear: Reacción atómica en la que el núcleo de un átomo pesado (como el uranio) se divide en dos o más núcleos más ligeros al ser bombardeado por un neutrón, liberando una gran cantidad de energía en forma de calor y radiación, así como neutrones adicionales que pueden causar más fisiones y desencadenar una reacción en cadena.

Radiación: Energía que emite un núcleo atómico inestable a través de un proceso llamado desintegración radiactiva, para transformarse en uno más estable. Se manifiesta como ondas electromagnéticas de alta energía, como los rayos X y gamma, o como partículas subatómicas, como las partículas alfa (núcleos de helio) y beta (electrones o positrones). Esta energía liberada puede ser ionizante, dañando células y ADN, y proviene tanto de fuentes naturales (el sol, rocas, rayos cósmicos) como artificiales (reactores nucleares)

Cracking: Proceso industrial que descompone las moléculas grandes y complejas de hidrocarburos presentes en el petróleo crudo en moléculas más pequeñas y ligeras, como la gasolina y el diésel. Este proceso se realiza en las refinerías mediante el uso de altas temperaturas y/o catalizadores para romper los enlaces carbono-carbono, haciendo que los productos resultantes sean más útiles y rentables para el consumo

Medio Ambiente: El medio ambiente es el conjunto de componentes naturales (aire, agua, suelo, seres vivos) y artificiales (creados por el ser humano) que interactúan entre sí, influenciando y condicionando la vida de todos los seres vivos en un lugar y momento específicos. Abarca los elementos físicos, químicos y biológicos del entorno, así como los valores sociales y culturales que afectan nuestro desarrollo presente y futuro.

Cambio Climático: Se define como la variación en el estado del sistema climático terrestre, formado por la atmósfera, la hidrosfera, la criosfera, la litosfera y la biosfera, que perdura durante periodos de tiempo suficientemente largos (décadas o más tiempo) hasta alcanzar un nuevo equilibrio. Puede afectar tanto a los valores medios meteorológicos como a su variabilidad y extremos.

Combustible: Un combustible es cualquier sustancia sólida, líquida o gaseosa que puede producir energía (calor, luz o energía mecánica) mediante una reacción química llamada combustión. Al reaccionar con un comburente (generalmente oxígeno), el combustible libera su energía almacenada, transformándola en formas útiles de energía y produciendo calor y otros residuos como el dióxido de carbono

Electricidad: La electricidad es una forma de energía que se produce por el movimiento y la interacción de partículas cargadas, como los electrones. Puede manifestarse como energía estática, que es una carga en reposo, o como corriente eléctrica, el movimiento continuo de estas cargas a través de un conductor

Resumen

Título: Análisis de la cadena productiva para la generación de energía nuclear y su comparación con el potencial energético de los hidrocarburos¹.

Autor: Iván Andrés Agudelo Arroyabe, Juan José Celis Sánchez².

Palabras Clave: Energía, Hidrocarburos, Nuclear, Emisiones, Comparación, Impacto

Esta tesis compara la cadena productiva de la energía nuclear y la contrasta con el potencial energético de los hidrocarburos, considerando variables como reservas, producción, demanda, costo, impacto ambiental y tecnologías que se requieren en cada energía. Así mismo se evaluó la influencia de variables como sostenibilidad energética, cambio climático, eficiencia energética y el impacto socioeconómico en el mundo. La energía nuclear genera entre 6 y 10 gCO₂ eq/kWh, mientras que los hidrocarburos (petróleo y gas natural) producen 390 y 700 gCO₂ eq/kWh; esto representa una reducción de más del 95% en emisiones al sustituir hidrocarburos por energía nuclear. No obstante, enfrenta desafíos asociados a la gestión de residuos radiactivos, los residuos nucleares equivalen a menos de 0.01 m³/MWh, aunque de alta peligrosidad, los hidrocarburos generan residuos sólidos, líquidos y gaseosos con volúmenes hasta 1000 veces mayores, especialmente lodos, CO₂, NO_x y SO_x. En el caso de Colombia, el análisis muestra que, aunque los hidrocarburos seguirán desempeñando un papel protagónico en el corto y mediano plazo especialmente el gas natural como combustible de transición, la disminución de reservas y la necesidad de cumplir compromisos climáticos hacen necesaria la diversificación de la matriz energética del país. La energía nuclear constituye una opción viable con una vida útil promedio de 60 años, frente a 25-30 años en plantas con combustible de hidrocarburos. Se puede concluir que con un modelo energético mixto en el que ambas fuentes de energía coexistan y así se representa un camino más realista para la transición energética en Colombia.

¹ Trabajo de Grado

² Facultad de Fisicoquímicas. Escuela de Petróleos. Director Diego Armando Vargas Silva.

Abstract

Title: Analysis of the production chain for nuclear energy generation and its comparison with the energy potential of hydrocarbons¹.

Author(s): Iván Andrés Agudelo Arroyabe y Juan José Celis Sánchez².

Key Words: Energy, Hydrocarbons, Nuclear, Emissions, Comparison, Impact

This thesis compares the nuclear energy production chain. It contrasts it with the energy potential of hydrocarbons, considering variables such as reserves, production, demand, cost, environmental impact, and the technologies required for each energy source. The influence of variables such as energy sustainability, climate change, energy efficiency, and the socioeconomic impact on the world was also evaluated. Nuclear energy generates between 6 and 10 gCO₂ eq/kWh, while hydrocarbons (oil and natural gas) produce 390 and 700 gCO₂ eq/kWh, representing a reduction of more than 95% in emissions by replacing hydrocarbons with nuclear energy. However, it faces challenges associated with radioactive waste management. Nuclear waste is equivalent to less than 0.01 m³/MWh. Although highly hazardous, hydrocarbons generate solid, liquid, and gaseous waste with volumes up to 1000 times larger, especially sludge, CO₂, NO_x, and SO_x. In the case of Colombia, the analysis shows that, although hydrocarbons will continue to play a leading role in the short and medium term, especially natural gas as a transition fuel, declining reserves and the need to meet climate commitments make it necessary to diversify the country's energy mix. Nuclear energy is a viable option with an average lifespan of 60 years, compared to 25-30 years for hydrocarbon-fueled plants. It can be concluded that a mixed energy model, in which both energy sources coexist, represents a more realistic path for the energy transition in Colombia.

¹ Bachelor Thesis

² Faculty of Physicochemistry. Petroleum School. Director Diego Armando Vargas Silva.

Introducción

Al hablar de energía nuclear es hablar de la creciente demanda energética y la urgente necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero; la exploración de fuentes alternativas de energía se ha convertido en un tema prioritario para los sectores industriales, estatales y académicos. Es por ello que la búsqueda de fuentes de energía eficientes y sostenibles es un tema crucial en la agenda global contemporánea.

La energía nuclear emerge como una opción viable y sostenible, especialmente en comparación con los hidrocarburos, que, aunque han sostenido históricamente la matriz energética mundial, presentan desafíos ambientales y de disponibilidad a largo plazo. Asimismo, “la energía nuclear y los hidrocarburos representan dos pilares principales en la matriz energética mundial, cada uno con implicaciones significativas en términos de seguridad energética, desarrollo económico y sostenibilidad ambiental” (Ugartemendia, 2024).

A pesar del desarrollo histórico del sector de hidrocarburos en Colombia, las reservas probadas muestran una tendencia decreciente, lo que pone en evidencia la necesidad de diversificar la matriz energética nacional. Este estudio realizará inicialmente un análisis detallado de los fundamentos teóricos de la cadena productiva involucrada en la generación de energía nuclear y sus beneficios y ventajas en comparación con la energía de los hidrocarburos.

Este estudio se propone explorar y analizar en profundidad tanto la generación de energía nuclear como el potencial energético de los hidrocarburos, con el objetivo de identificar sus ventajas, limitaciones y posibles impactos en el contexto actual de transición hacia una economía baja en carbono. Al comprender las complejidades y dinámicas de ambas cadenas productivas, es importante entender cómo funciona la energía nuclear y que diferencias tiene con la energía de los hidrocarburos además como está funcionando en el

mundo y como esto puede ayudar a cada país y a “Colombia en diversificar su seguridad energética pretendiendo contribuir al debate sobre la viabilidad y el papel futuro de estas fuentes de energía en la búsqueda de un sistema energético más seguro, limpio y sostenible” (Santander Marin, 2025). La metodología que se utilizó fue un enfoque cualitativo utilizando como método la revisión bibliográfica, con el fin de identificar, analizar y sintetizar la producción académica y técnica relacionada con las proyecciones energéticas en Colombia y el mundo. Para llevar a cabo los análisis se usaron principalmente las bases proporcionadas por la Universidad Industrial de Santander (Elsevier, SCOPUS, One Petro de SPE y el repositorio de trabajos de grado UIS), asimismo, se consultaron otras bases de datos como Scielo, Redalyc y Google Académico. Al momento de seleccionar los documentos finales para el trabajo, se tuvo en cuenta año de publicación cuando se trataba de temas de tecnologías o criterios del país, que estos van cambiando a través de los años en esos casos se tenía en cuenta el año de la publicación del documento que fuera lo más reciente y se excluían lo que fueran más antiguos. Además, la relevancia de los documentos se tuvo muy en cuenta a la hora de la selección de que fueran de autores con maestría o doctorado, y que fueran libros reconocidos que tuvieran un impacto en el país donde se desarrolló. Las referencias seleccionadas son consideradas pertinentes para sustentar epistemológicamente la pregunta de investigación planteada y así desarrollar los objetivos de manera correcta; los hallazgos encontrados y los aportes permiten comparar de forma cualitativa la energía nuclear y los hidrocarburos.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Comparar la generación de energía nuclear con el potencial energético de los hidrocarburos.

1.2. Objetivos Específicos

- Revisar las generalidades de la generación de energía nuclear y su comparación con la energía de los hidrocarburos (Tecnologías).
- Identificar las variables que intervienen en la generación de energía eléctrica a partir de energía nuclear y los hidrocarburos. (Reserva, demanda y producción).
- Definir el impacto ambiental que genera el uso de energía nuclear y su comparación con los hidrocarburos.
- Comparar el potencial energético de la generación de energía eléctrica a partir de la energía de los hidrocarburos y la energía nuclear-costos

2. Fundamentos teóricos y estado del arte

2.1. Marco de referencia

Contextualización de Energía Nuclear y de los Hidrocarburos

La mayor parte de los países del mundo dependen en gran medida de los hidrocarburos para satisfacer sus necesidades energéticas; sin embargo, en los últimos años, ha habido un creciente interés en la energía nuclear como una alternativa viable y sostenible. Duarte Bernal (2022) describe la energía nuclear como aquella energía que se libera desde el núcleo o parte central de los átomos, que consta de protones y neutrones.

Esta fuente de energía puede producirse de dos maneras: “mediante fisión (cuando los núcleos de los átomos se dividen en varias partes) o mediante fusión (cuando estos se fusionan)”. (García, 2023, p. 21). A pesar de los desafíos actuales, la energía nuclear sigue siendo una opción atractiva para los países desarrollados y en desarrollo, debido a su potencial para proporcionar energía limpia y confiable a largo plazo. “La demanda de hidrocarburos debe mantenerse estable en el corto y mediano plazo, lo que representa una oportunidad para que varios países preserven la estabilidad de sus economías gracias al aprovechamiento de estas fuentes de energía convencionales” (García, 2023, pp. 8-9).

Sin embargo, es necesario implementar estrategias para mitigar los impactos ambientales y sociales de la industria, así como diversificar la matriz energética con fuentes renovables. Es importante señalar que la innovación, los avances tecnológicos y unos nuevos modelos económicos son recursos fundamentales que sirven para aumentar la contribución de la energía nucleoelectrónica (se utiliza en el contexto de la generación de electricidad a partir de la energía nuclear) a la matriz energética mundial y al desarrollo sostenible.

Los nuevos diseños de reactores nucleares presentan características de seguridad mejoradas y pueden funcionar de una manera más eficaz con menos desechos, o incluso consumirlos. Bazan Perkins (2005) expresa que “la generación de electricidad basándose en la energía nuclear y renovables, en sustitución de los combustibles fósiles, estaría participando activamente al decremento de los gases de efecto invernadero” (p. 295).

Los hidrocarburos son recursos finitos y están sujetos a la disponibilidad de reservas, lo que puede conducir a fluctuaciones en los precios y a preocupaciones sobre la seguridad del suministro a largo plazo. Por otro lado, “el combustible principal para la energía nuclear conocido como el uranio es más abundante y está ampliamente distribuido en comparación con los hidrocarburos”. Sin embargo, el acceso a uranio también puede verse afectado por consideraciones geopolíticas” (Bazan Perkins, 2005)

Proyección de la Energía Nuclear y de los Hidrocarburos en Colombia y el mundo

La energía nuclear, con varios años de desarrollo en el mundo, atraviesa hoy una etapa de transformación decisiva. La transición global hacia energías limpias enfrenta el reto de que fuentes como la solar y la eólica, aunque crecientes, aún no cubren la demanda energética. En este contexto, la energía nuclear se proyecta como una alternativa estratégica para garantizar un suministro estable, limpio y seguro (Fresco, 2024).

Este tipo de energía a nivel mundial ha estado consciente de que debe dejar atrás los combustibles fósiles y transitar hacia las energías renovables, la energía nuclear puede contribuir a eliminar progresivamente el uso de combustible fósiles en el transporte de vehículos a nivel mundial con la utilización de vehículos eléctricos enchufables y de batería al igual que los autos híbridos que utilizan una red de carga directa. Pero se ha estado implementando una pila de combustible que convierte el hidrógeno y oxígeno en agua, y en el

proceso produce electricidad que a diferencia de las baterías que utilizan los vehículos eléctricos. Una batería almacena todas sus sustancias químicas en su interior y las convierte en electricidad. Esto significa que, con el tiempo, la batería se descarga y hay que desecharla o recargarla. En una pila de combustible, los productos químicos fluyen constantemente hacia ella, por lo que nunca se agota. Mientras haya flujo de productos químicos hacia la pila, la electricidad saldrá de ella. La mayoría de las pilas de combustible actuales utilizan hidrógeno y oxígeno como componentes químicos. Una pila de combustible proporciona un voltaje de CC (corriente continua) que puede utilizarse para alimentar los motores de los vehículos; estas pilas de combustible utilizan hidrógeno y oxígeno que pueden producirse a través del calor que produce un reactor nuclear separando el agua (H_2O) en hidrógeno y oxígeno que se almacena para producir estas pilas de combustible.

A medida que aumenta la demanda de electricidad a nivel mundial, se eleva el interés en construir nueva capacidad nuclear. Estas innovaciones destacan los reactores modulares pequeños (SMR), más económicos, seguros y rápidos de instalar.

Con el respaldo de políticas públicas y capital privado, estos diseños podrían alcanzar una capacidad mundial de 40 GW hacia 2050, con potencial de superar ampliamente esa cifra. Paralelamente, los reactores de cuarta generación impulsados por el Foro Internacional de la 4ª Generación (GIF) agrupan a 13 países en el desarrollo de seis tecnologías que buscan mayor eficiencia, sostenibilidad y reducción de residuos radiactivos (Fresco, 2024, p. 25).

Los reactores modulares, futuro para la energía nuclear a diferencia de los convencionales, son de menor tamaño, más económicos y sus partes pueden ser producidas industrialmente, lo que acortaría los tiempos de construcción y permitiría su ensamblaje en todo tipo de sitios (Madariaga, 2024, p. 14).

Para Colombia, estas tendencias abren un campo de oportunidad. La diversificación de la matriz energética, la creciente demanda eléctrica y los compromisos de descarbonización hacen viable evaluar la incorporación de tecnologías nucleares. “Los SMR, en particular, resultan atractivos por su escalabilidad, menor costo y adaptabilidad a distintos territorios, lo que los convierte en una posible ruta para garantizar seguridad energética y apoyar la transición hacia un futuro sostenible” (Treviño Jara, 2025, p. 37).

Por su parte, los hidrocarburos continúan siendo una de las principales fuentes de energía en el mundo y en Colombia. Sin embargo, enfrentan un futuro incierto debido a los retos ambientales y a la creciente demanda de energías más limpias y sostenibles. “Aunque la demanda de combustibles fósiles se ha mantenido alta en los últimos años, se observa una desaceleración en la incorporación de nuevos proyectos basados en estas fuentes, en parte por el avance de alternativas de bajas emisiones” (Zhang, 2024, p. 51).

Sin embargo, la transición energética no será inmediata. La fuerte dependencia de los hidrocarburos (desde el consumo doméstico hasta la producción industrial) hace inviable un abandono abrupto sin generar inestabilidad económica y social. Documentos recientes del Departamento Nacional de Planeación (DNP) señalan que “aunque el objetivo es avanzar hacia la electrificación limpia, en el corto y mediano plazo los combustibles fósiles seguirán cumpliendo un rol fundamental en la seguridad energética del país” (Navarro Sarmiento, 2023, p. 54).

En Colombia, las estadísticas muestran que el sector de hidrocarburos continúa siendo el único capaz de cubrir la mayor parte de la demanda energética. Esto se debe tanto a la consolidación de su infraestructura como a la falta de una articulación más efectiva que impulse proyectos de energías no convencionales a gran escala.

De cara al futuro, “se prevé que la industria petrolera mantenga su relevancia, pero bajo mayores exigencias de sostenibilidad, responsabilidad ambiental y aportes a la reparación y compensación social” (Navarro Sarmiento, 2023). En este escenario, los hidrocarburos transitarán por dos posibles caminos: “una reducción progresiva de sus fuentes de extracción y la presión creciente de gobiernos e instituciones internacionales hacia una transición que, tarde o temprano, marcará el abandono de esta actividad como base energética principal” (Navarro Sarmiento, 2023, p. 13).

Proyectos a futuro de la Energía Nuclear y de los Hidrocarburos en Colombia y el mundo

De acuerdo con Torres (2025), “el panorama energético mundial se encuentra en un momento de transformación en el que la búsqueda de fuentes más limpias y sostenibles se combina con la necesidad de garantizar un suministro seguro y constante”. En este contexto, Colombia enfrenta el reto de diversificar su matriz energética y proyectar su futuro entre la innovación nuclear y la permanencia estratégica de los hidrocarburos, particularmente el gas natural.

La energía nuclear se perfila como una alternativa sólida dentro de la transición. “Los avances tecnológicos recientes apuntan a los pequeños reactores modulares (SMR), en 2025 ya cuentan con más de 80 diseños, destacando el VOYGR de NuScale, certificado en Estados Unidos, y propuestas de empresas como GE Hitachi, Rolls-Royce y Westinghouse” (Galeano, 2023, p. 9). Estos modelos se caracterizan por su seguridad, rentabilidad y flexibilidad, cualidades que los hacen viables para países que buscan reducir emisiones sin sacrificar estabilidad energética.

Paralelamente, los combustibles tolerantes a accidentes (ATF) y el combustible TRISO avanzan hacia la producción comercial, lo que fortalece la seguridad de los reactores. Incluso

la producción de hidrógeno limpio mediante energía nuclear gana terreno en el mundo, con proyectos en Estados Unidos, Francia y Japón respaldados por incentivos políticos y fiscales. Para Colombia, estas tendencias no son ajenas: el Plan Energético Nacional plantea la instalación de SMR a partir de 2035, con una meta de 1.800 MW de capacidad nuclear hacia 2052, lo que representaría un salto significativo en su camino hacia la descarbonización y la seguridad energética (Torres, 2025).

No obstante, la realidad colombiana demuestra que, al menos en el corto y mediano plazo, los hidrocarburos seguirán teniendo un papel protagónico. El gas natural se posiciona como combustible de transición y motor de proyectos estratégicos. En el ámbito nacional, “se destacan iniciativas como la Central Termoeléctrica Nencol 5 en Santa Marta, con una capacidad proyectada de 1.140 MW” (Min-energía, 2022), y “la modernización de Termoguajira en La Guajira, que migrará del carbón al gas natural en 2025” (Min-energía, 2023). Estas obras no solo responden a la creciente demanda de electricidad, sino que también representan un esfuerzo por reducir la huella ambiental de un sector históricamente basado en combustibles más contaminantes.

En síntesis, las proyecciones energéticas de Colombia apuntan hacia un modelo mixto en el que la energía nuclear y los hidrocarburos, en especial el gas natural, cumplirán roles complementarios. La primera se vislumbra como la apuesta de largo plazo, clave para alcanzar la meta de una matriz limpia y sostenible; los segundos, como soporte inmediato para garantizar el abastecimiento mientras se consolidan las tecnologías emergentes.

3. Revisión de las generalidades para la generación de energía nuclear y su comparación con los hidrocarburos

3.1. Desarrollo de los aspectos generales de la generación de energía

La generación de energía nuclear se ha situado como una alternativa eficaz para satisfacer la línea ascendente de la demanda energética mundial (Madariaga Martínez, 2024). Su operación se fundamenta en la capacidad de liberar grandes cantidades de energía a partir de la fisión de átomos pesados, principalmente de los átomos del uranio. “Un proceso que ocurre en centrales nucleares, ofreciendo una densidad energética significativa a otras fuentes de energía” (Madariaga Martínez, 2024). Las generalidades que abarcaremos en este capítulo serán clave para dar contexto al funcionamiento de estos procesos nucleares, generalidades como la radiactividad, los principales elementos radiactivos, el proceso de la radiactividad inducida, las dos formas por las cuales se obtiene la energía nuclear y las generalidades donde se lleva a cabo este proceso, como lo es un reactor nuclear.

La energía nuclear se observa como una alternativa crucial para producir grandes cantidades de energía. En la historia, los hidrocarburos han sido la fuente principal de energía, marcando épocas gloriosas para su desarrollo como para su producción que también ha pasado por momentos difíciles, asimismo crisis económicas y desastres ambientales. Por esto es necesario conocer las generalidades principalmente de la energía nuclear y un contexto de la fuente de hidrocarburos para su debida comparación.

Radioactividad

El origen de un desarrollo científico extraordinario en el campo de la física y la química, en particular el conocimiento del átomo y la materia, hace ya un siglo, resulta en el

descubrimiento de la radioactividad. Este término se dio gracias al investigador Enrique Becquerel cuando fue descubierta en unas sales de uranio por la acción que se da sobre una placa fotográfica en 1896. Las radiaciones radioactivas se revelan por sus efectos, que son principalmente tres: 1. Acción fotográfica, 2. Fluorescencia de ciertos cuerpos, 3. Descarga de un electroscoipo (Laciar, 1958, p. 36).

Al realizar estudios sobre la fluorescencia del sulfato doble de uranio y potasio. Descubre que el uranio emite espontáneamente una radiación. Tal característica del uranio se vería después en otros elementos, que poseen la capacidad de emitir radiaciones sin ser excitados previamente; esto recibió el nombre de radioactividad. En ese mismo año demostró que la radioactividad del uranio es una propiedad atómica y no molecular, por ende, se tiene como elementos a estos cuerpos radioactivos y no como compuestos.

Pierre y Marie Curie realizaron unas de las investigaciones más importantes para su época, quienes descubrieron en 1898 el polonio y el radio, ambos en ese mismo año. “El elemento radioactivo más usado es el radio, que va siempre junto con el uranio, en una proporción constante” (Laciar, 1958, p. 37).

Ernest Rutherford y Frederick Soddy estudiaron por una parte la naturaleza de la radiación emitida y el fenómeno de la radioactividad. Los rayos alfa, beta y gamma, emitidos por los cuerpos radioactivos no se reflejan, ni se refractan, ni se polarizan; se propagan en línea recta: pero son desviables, en sentido contrario, los alfa y beta por la acción de un campo magnético (los beta mucho más que los alfa). De estas desviaciones se deduce la velocidad de las partículas que forman dichos rayos y la relación de su carga a su masa (Laciar, 1958).

La radioactividad es una reacción nuclear de descomposición espontanea, en otras palabras, un núcleo inestable se descompone es otro que es más estable que él, a su vez emite

una radiación, el núcleo del resultado de la desintegración puede ser no tan estable, por ende, se desintegra un tercero, este puede continuar el proceso y este hasta que se llegue a un núcleo estable. Estas reacciones de los núcleos en conjuntos de desintegración forman una serie o familia radiactiva. Estos aportes beneficiaron a la causa de una investigación, del radio, que llevaron a importantes avances en ámbitos como la física nuclear como también el uso de la radioterapia como hecho importante para el tratamiento del cáncer.

Elementos radioactivos

Los elementos radioactivos se definen como una clase especial de contaminantes caracterizados por un núcleo inestable que sufre desintegración radiactiva espontánea, emitiendo protones, neutrones o electrones en forma de radiación. Estos elementos fueron denominados en la tabla periódica como elementos radiactivos. “Aunque sean todos inestables, se diferencia por el tiempo que necesitan para su desintegración, que es el tiempo en el cual la cantidad de un radioisótopo pasa a ser de la mitad, variando en función de sus propiedades nucleares” (García & Moreno, 2018, p. 4). La explosión, pues, de un átomo radioactivo expulsa átomos de masa igual o inferior a la suya (por ejemplo: Radio= Radón + Helio) y rayos alfa, beta y gamma, cuya energía inicialmente de forma cinética, termina en térmica al quedar detenidos por algún obstáculo (1 gr. de Radio equivale a 400 kg. de carbón = 3.000.000.000 de calorías) (Laciar, 1958, p. 38). Los átomos radioactivos no desaparecen simplemente con el paso del tiempo, sino que se desintegran de manera natural. Este proceso ocurre según las condiciones del entorno y el tipo de isótopo, sin poder determinar con exactitud cuándo o cómo ocurrirá su desintegración. “Las preparaciones radioactivas más activas que se han obtenido dieron mil millones de partículas alfa por segundo, las cuales se pueden emplear como proyectiles naturales de bombardeo” (Laciar, 1958). Los elementos primordiales son aquellos

que, a pesar de su reactividad intrínseca, presentan formas metaestables (isótopos con semividas muy elevadas, en este caso, superiores a la edad de la Tierra). Debido a esto, una elevada fracción de “la masa primordial de estos elementos puede encontrarse aún de manera inalterada en la corteza terrestre, y su relativa riqueza conllevó su descubrimiento y caracterización, relativamente temprana en comparación con el resto de elementos radiactivos de la tabla periódica” (García & Moreno, 2018). A continuación, una breve descripción de estos elementos primordiales:

Bismuto: Descubierto en Francia en 1753 por el químico francés Claude François Geoffroy, este elemento fue el primer detallado. Su principal isótopo se desintegra emitiendo radiación alfa con una larga vida, conlleva que su uso y manipulación sean seguros desde un punto de vista radioactivo.

Uranio: “Se presenta de forma natural con mayor presencia, por tener tres isótopos metaestables: el ^{238}U , el ^{235}U y el de menor medida el ^{234}U ” (García & Moreno, 2018). Se desintegran mediante emisión de partículas alfa y, de forma más reducida, en procesos de fisión. Es el elemento primordial más pesado, y a partir de su desintegración se descubrirían posteriormente gran cantidad de elementos desconocidos hasta ese momento.

Torio: Identificado en 1828 por Jacob Berzelius, un químico sueco. Su existencia se debe a la vida media que tiene su principal isótopo, el 232, según equivale a la edad del universo, pudiendo encontrarse en distintos materiales. “El torio sería, además, el segundo elemento en ser caracterizado como radiactivo, por Gerhard Carl Schmidt y Marie Curie, independientemente, en 1898” (García & Moreno, 2018).

Los elementos radioactivos se especifican por la clase de radiaciones que emiten, ya

que cada elemento emite una o dos clases de rayos u otro no emite, sino que transmite. Por su radio de acción, ya que cada elemento radioactivo tiene una distancia en que ya no propaga más esas radiaciones, conocida como alcance según Laciari (1958), el del radio es de 3,13 cm, el del núcleo de 5,5 cm. Estas distancias con ayuda del electroscopeo o la pantalla fluorescente. La velocidad de emisión de los rayos expulsados por los átomos de sustancias radioactivas como el radio y demás análogas se determina midiendo la magnitud de su desviación al pasar por un campo magnético (generado por un imán). “Las partículas emitidas por las sustancias radioactivas, como las referidas previamente, pueden alcanzar velocidades de hasta unos 10.000 km/s” (Laciari, 1958, p. 40). Además, estas sustancias se caracterizan por la pérdida gradual de su actividad con el tiempo, lo que se debe a su descomposición atómica. El periodo necesario para esta descomposición se denomina vida y es una característica única de cada elemento radioactivo.

Radioactividad inducida

También conocida como radiactividad artificial, se conoce como el proceso en el cual se crea un elemento radiactivo a partir de uno estable. Fue descubierta por los esposos Curie; la radiactividad inducida es el resultado de una acción humana. “En 1934, Irene Curie y su esposo Frédéric Joliot-Curie descubrieron la radiactividad artificial al encontrar que el boro y el aluminio se tornaban radiactivos al ser bombardeados por los rayos alfa (núcleos de helio-4) emitidos por el polonio” (Servian, 2021, p. 75). “El descubrimiento de los Joliot-Curie hizo renacer el interés en el tema e indujo al joven y brillante físico teórico italiano Enrico Fermi a entrar a trabajar en el campo experimental” (Calvo, 2010). El método utilizado es el bombardeo con neutrones, diseñado por Fermi; su método se puede aplicar a casi todos los elementos químicos y se le conoce como el efecto Fermi. El efecto Fermi, consiste en bombardear con

neutrones casi la totalidad de elementos químicos, aún los más pesados y estables, resultando otros elementos dotados de radioactividad, los cuales se desintegran espontáneamente lanzando negatrones que son partículas beta negativas; esto dice que el caso es diverso del que se obtiene bombardeando con proyectiles alfa, porque en este caso, lo que se desprende son protones (+) Y no, negatrones (-).

Se atribuye el hecho a que, aunque los neutrones proceden de manantiales 100.000 veces menos intensos que los de las partículas alfa, tienen en cambio la ventaja de carecer de carga eléctrica, lo cual les franquea el paso al través del átomo y les permite acercarse y hasta penetrar en el mismo núcleo de los átomos pesados, del cual son repelidas las partículas alfa (Laciar, 1958, p. 43). Con este procedimiento, “Fermi logró transformar el uranio que tiene como número atómico el 92 y crea entonces un nuevo número atómico el 93 (transuránico) llamado neptunio” (Laciar, 1958). Un número mayor al número atómico del uranio, presente en un cuerpo radiactivo artificial, con la ayuda del método de la radiactividad inducida. Logrando un elemento que no existe en la naturaleza y así logrando el hito de un nuevo elemento como una hazaña importante.

Forma de obtener la energía nuclear

Existen dos formas en las cuales podemos obtener la energía nuclear, por fisión nuclear, que es la desintegración de los átomos, y por fusión nuclear, que es la síntesis de los átomos.

Fisión nuclear:

En 1939, Otto Hahn y Fritz Strassmann, del Instituto de Química de Berlín, anunciaron el descubrimiento de un nuevo proceso nuclear: la fisión del uranio irradiado con neutrones lentos, liberando aproximadamente 200 MeV por evento. “La fisión nuclear es un proceso

físico en el que el núcleo de un átomo pesado, como el uranio, se divide en núcleos más ligeros, liberando una enorme cantidad de energía, superior a la generada en cualquier reacción química” (Laciar, 1958). Este fenómeno, controlado en los reactores, constituye la base de la producción de electricidad en las centrales nucleares; sin control, es el principio de las armas atómicas. La fisión, por tanto, representa tanto una fuente energética limpia y poderosa como un recordatorio del potencial destructivo de la manipulación del átomo.

El proceso ocurre porque los fragmentos resultantes están más firmemente ligados internamente que el núcleo original. Dicho de otra manera, “la energía de enlace por nucleón es mayor en los productos de fisión que en el núcleo inicial”. Esa diferencia se transforma en energía liberada, principalmente en forma de energía cinética de los fragmentos” (Hermoso, 2025).

Existen dos formas de fisión: espontánea y provocada. La fisión espontánea ocurre en núcleos muy pesados, cuando la barrera de Coulomb se reduce hasta desaparecer, permitiendo la separación de los fragmentos sin intervención externa. “No obstante, en la mayoría de los casos es necesario un estímulo adicional, como la captura de un neutrón, que lleva al núcleo a un estado excitado, provocando su deformación y posterior ruptura” (Galfrascoli, 2024).

Cuando un núcleo se fisiona, además de los dos fragmentos principales, se liberan neutrones adicionales. En el caso del uranio-235, cada evento libera en promedio dos o tres neutrones, capaces de inducir nuevas fisiones. Este mecanismo genera una reacción en cadena, que, bajo control, mantiene en operación a los reactores nucleares y, en condiciones no controladas, produce las explosiones de las armas nucleares (Hermoso, 2025).

Fusión nuclear:

La fusión nuclear es un proceso mediante el cual dos núcleos atómicos ligeros,

generalmente de hidrógeno y sus isótopos (deuterio y tritio), se combinan para formar un núcleo más pesado, liberando en el proceso una enorme cantidad de energía.

A diferencia de la fisión nuclear, que consiste en la división de núcleos pesados, la fusión se basa en la unión de núcleos ligeros. Este fenómeno se da de manera natural en el Sol, donde los núcleos de hidrógeno se fusionan para formar helio, liberando grandes cantidades de energía en forma de radiación electromagnética (luz y calor), la cual llega hasta la Tierra y hace posible la vida.

La magnitud energética de la fusión es extraordinaria, ya que permite generar enormes cantidades de energía a partir de una mínima cantidad de materia prima. De hecho, la potencia de las armas termonucleares, basadas en este principio, puede ser entre 1000 y 2500 veces mayor que la de la bomba de Hiroshima (Laciar, 1958, p.55).

Sin embargo, aunque suele asociarse con explosiones y riesgos en plantas de energía, esta percepción resulta equivocada. A diferencia de la fisión, que se utiliza en centrales nucleares y produce residuos radiactivos de larga duración, la fusión nuclear es considerada intrínsecamente más segura: no genera desechos radiactivos permanentes, no emite gases de efecto invernadero y no presenta el riesgo de una reacción en cadena incontrolable. “La fusión nuclear genera aproximadamente 4 veces más energía que la fisión, y la generación de esta energía sí puede ser controlada a través de reactores experimentales en la tierra” (Madariaga, 2024).

Estas ventajas hacen de la fusión una de las alternativas energéticas más prometedoras. Su combustible —el hidrógeno presente en el agua— es abundante y accesible, y su rendimiento es altamente eficiente. No obstante, su desarrollo enfrenta importantes desafíos técnicos y económicos. Pese a ello, se proyecta que, con cooperación internacional y avances

tecnológicos, la fusión nuclear pueda consolidarse en las próximas décadas como una fuente de energía sostenible, segura y limpia para el futuro.

Reactores Nucleares

Un reactor nuclear, también llamado pila atómica, es esencialmente un sistema de reacción en cadena en el cual la energía liberada por la fisión del uranio, plutonio u otros materiales fisionables se controla y aprovecha bajo condiciones previamente establecidas (Laciar, 1958, p. 4). “Para que esta reacción en cadena sea útil en un reactor nuclear, debe ser autosostenida y no extinguirse tras un número limitado de etapas” (Vidal, 1962, p. 377).

Para lograrlo, es necesario incorporar un moderador, cuya función es frenar los neutrones de alta energía, reduciendo su velocidad hasta niveles adecuados para inducir nuevas fisiones de manera eficiente. “Entre los materiales más empleados como moderadores se encuentran el agua ligera, el agua pesada, el berilio, su óxido y el grafito” (Vidal, 1962).

En síntesis, un reactor nuclear se compone, en términos generales, de tres elementos esenciales: un material fisionable, como el uranio o el plutonio, un moderador, que regule la energía de los neutrones, y un sistema de control, encargado de mantener la reacción en condiciones seguras y estables.

3.2. Material escindible (material para fisión nuclear)

Tres son los productos desintegrables susceptibles de ser empleados como combustibles nucleares: Uranio-235, Plutonio-239 y el Uranio-233.

De los principales isótopos utilizados en la generación nuclear, solo el uranio-235 (U-235) se encuentra de forma natural, mezclado con uranio-238 (U-238) en una proporción aproximada del 0,7 % de U-235 y 99,3 % de U-238. Los otros dos, plutonio-239 (Pu-239) y

uranio-233 (U-233), son isótopos artificiales que se producen mediante el bombardeo con neutrones del U-238 y del torio-232 (Th-232), respectivamente.

Tanto el plutonio-239 como el uranio-233 son combustibles nucleares valiosos pero difíciles de obtener, debido a los procesos tecnológicos complejos que requieren para su producción y manejo. “Los elementos combustibles se protegen con envolturas de aluminio, zirconio, berilio o aleaciones especiales que permiten evitar fenómenos de corrosión e impedir la dispersión de los residuos”. (Vidal, 1962, p. 380).

3.3. Moderador (Regular la energía de los neutrones)

El papel de estas sustancias que reciben el nombre de moderadores es “actuar de agente pasivo en las colisiones con neutrones haciendo que éstos disipen su energía como consecuencia de una disminución de su velocidad” (Vidal, 1962). la parafina fue el primer agente moderador, pero pronto fue sustituida por el agua pesada, el agua pesada solo se utilizaba en investigación por su difícil obtención después se pasó a utilizar agua ordinaria que la hay en más proporción y es más fácil de obtener en cualquier lugar, “también se han utilizado como moderadores el grafito, el berilio y su oxido” (Vidal, 1962).

3.4. Refrigerante y transportador de calor

El aprovechamiento práctico y útil de una reacción en cadena se basa en transformar dicha energía calorífica en energía mecánica o en energía eléctrica” (Vidal, 1962, p. 384). Se precisa, por tanto, un vehículo que pueda eliminar dicha energía calorífica y la intercambie con el exterior en forma aprovechable (Electricidad). Para estos fines se ha empleado con mucha frecuencia el agua ordinaria y el agua pesada.

3.5. Tipos de reactores

Reactores con moderador de grafito:

Pertenecen a la clase de reactores heterogéneos, “los reactores con moderador de grafito se caracterizan por ser de gran tamaño, ya que se necesitan “apilar” grandes cantidades de uranio natural para alcanzar el estado crítico” (Vidal, 1962). De ahí el primitivo nombre de “pila atómica”.

Reactores Heterogéneos con moderador de Agua (PWR, BWR)

Los reactores con moderador de agua pueden funcionar bajo presión para evitar la ebullición del líquido. Esto permite que el agua circule a elevada temperatura y genere vapor en un circuito secundario. “Igualmente se puede dejar hervir el moderador a alta temperatura y tomar el vapor para alimentar directamente una turbina”. (Vidal, 1962)

Reactores homogéneos

Los reactores homogéneos son sistemas donde los reactivos, productos y cualquier otra especie química (como catalizadores) se encuentran en una única fase. Esta fase puede ser líquida o gaseosa, y para asegurar la reacción se crean soluciones o mezclas que son uniformes en todo el equipo. “Los tipos comunes de reactores homogéneos incluyen reactores tipo tanque agitado (para mezclas líquidas o gaseosas) y reactores tubulares (más para gases)”. (Ochoa, García, & Aragonés, 2010)

Reactores modulares pequeños (SMR)

Son una clase de pequeños reactores de fisión nuclear, diseñados para construirse en

una fábrica, enviarse a sitios operativos para su instalación y luego usarse para alimentar edificios u otras instalaciones comerciales, de los muchos diseños de SMR, el reactor de agua a presión PWR es el más común. Estos pequeños reactores modulares pueden diseñarse para suministrar una potencia eléctrica de 300 MW por módulo. (Durán et al., 2022).

Una de las características clave de los SMR es el modularidad tanto en la fabricación como en el despliegue. Para los SMR, debido a una potencia térmica sustancialmente menor, los componentes del sistema primario se pueden integrar dentro o en la proximidad de la vasija del reactor, por lo tanto, formando un módulo de reactor que elimina la necesidad de tuberías de grandes longitudes para el refrigerante (Mendoza & Lopes, 2019).

Otra característica importante de los SMR es su uso potencial en aplicaciones no eléctricas. Si bien las grandes plantas nucleares y de combustibles fósiles se usan casi exclusivamente para producir electricidad, algunos SMR innovadores que operan a temperaturas más altas (por ejemplo, reactores de alta temperatura enfriados por gas) tienen potenciales aplicaciones adicionales. Las aplicaciones de cogeneración para las que los SMR son particularmente adecuados son: 1) la provisión de calor de proceso para aplicaciones industriales; 2) calefacción urbana; y 3) desalinización térmica (Mendoza & Lopes, 2019).

3.6. Tecnologías y uso de la energía de los combustibles fósiles

Las tecnologías y uso principal de la energía generada por los combustibles fósiles son la quema en centrales térmicas para generar electricidad y la combustión para obtener calor y energía mecánica. Los usos principales son la generación de energía eléctrica, el transporte, la calefacción y refrigeración doméstica e industrial (Harper, 2009).

Las tecnologías principales y alternativas utilizadas son:

Centrales térmicas: Consisten en quemar gas natural o petróleo para calentar agua, producir vapor y mover turbinas que generan electricidad.

Combustión: Se utiliza para mover motores de combustión interna en vehículos y para calderas industriales y domésticas. Los usos principales y alternativos de la energía de los combustibles fósiles.

Generación de electricidad: muchas centrales eléctricas siguen funcionando con combustibles fósiles, especialmente gas natural. Transporte, la gasolina diésel y el combustible de aviación son derivados del petróleo, impulsando la mayoría de los vehículos de transporte terrestre, aéreo y marítimo.

Calefacción y refrigeración, se utiliza el gas natural para sistemas de calefacción en hogares, edificios e industrias.

Usos domésticos: se usan para la cocina y para obtener calor en general y muchos otros usos. Por eso se crea una comparativa de las tecnologías de las dos energías.

Tabla 1.

Características comparativas de la energía nuclear y los hidrocarburos

Características	Energía Nuclear	Energía de hidrocarburos
Fuente principal	Fisión de uranio/plutonio	Combustión de gas, petróleo
Emisiones de Carbono	Muy bajas (12 gCO ₂ eq/kwh)	Altas (490-820 gCO ₂ eq/kwh)
Tecnologías claves	Reactores (PWR, BWR)	Turbinas de gas, plantas termoeléctricas, reforma de metano
Residuos	Radioactivos, gestionados	CO ₂ , NO _x , SO _x , partículas
Seguridad	Riesgos de accidentes graves, pero tiene más seguridad	Riesgos de explosiones, contaminación crónica
Costos	Alta inversión inicial, bajo costo operativo	Inversión y operaciones variables, alto costo ambiental
Disponibilidad	Energía de base, continua	Flexible, respuesta rápida

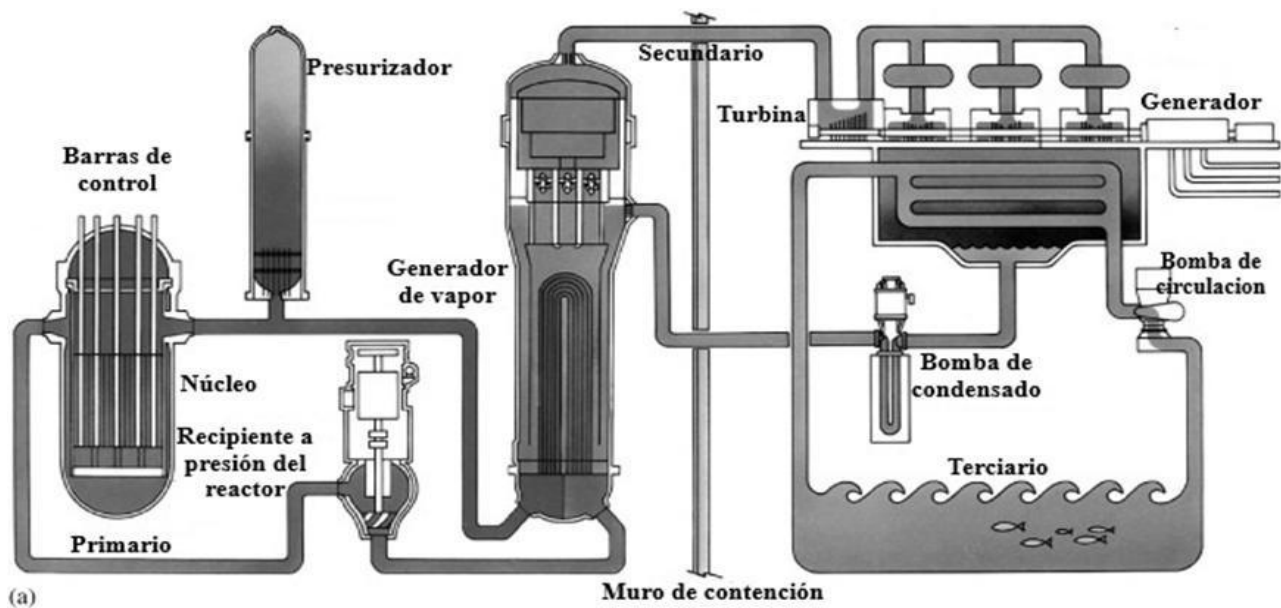
Nota: la tabla fue elaborada propiamente y los datos sacados del International Energy Agency (IEA)

Analizando los componentes de centrales térmicas que utilizan combustibles fósiles y contraponiendo ambas energías, se evidencia que, si bien la energía nuclear presenta una alta inversión inicial y requiere una gestión de residuos radiactivos, sus emisiones de carbono son insignificantes. Por el contrario, la energía que ofrecen los hidrocarburos, aunque sea flexible y de respuesta rápida, tiene un alto costo ambiental debido a sus elevadas emisiones de CO₂, NO_x y SO_x.

En forma general, la energía nuclear ofrece una solución con un menor impacto de carbono pero que presenta desafíos específicos en términos de seguridad, ámbito sociopolítico y la gestión de residuos, mientras que la energía de los hidrocarburos, a pesar de tener una larga historia, continúa generando un impacto ambiental significativo.

Figura 1.

Esquema de una central eléctrica

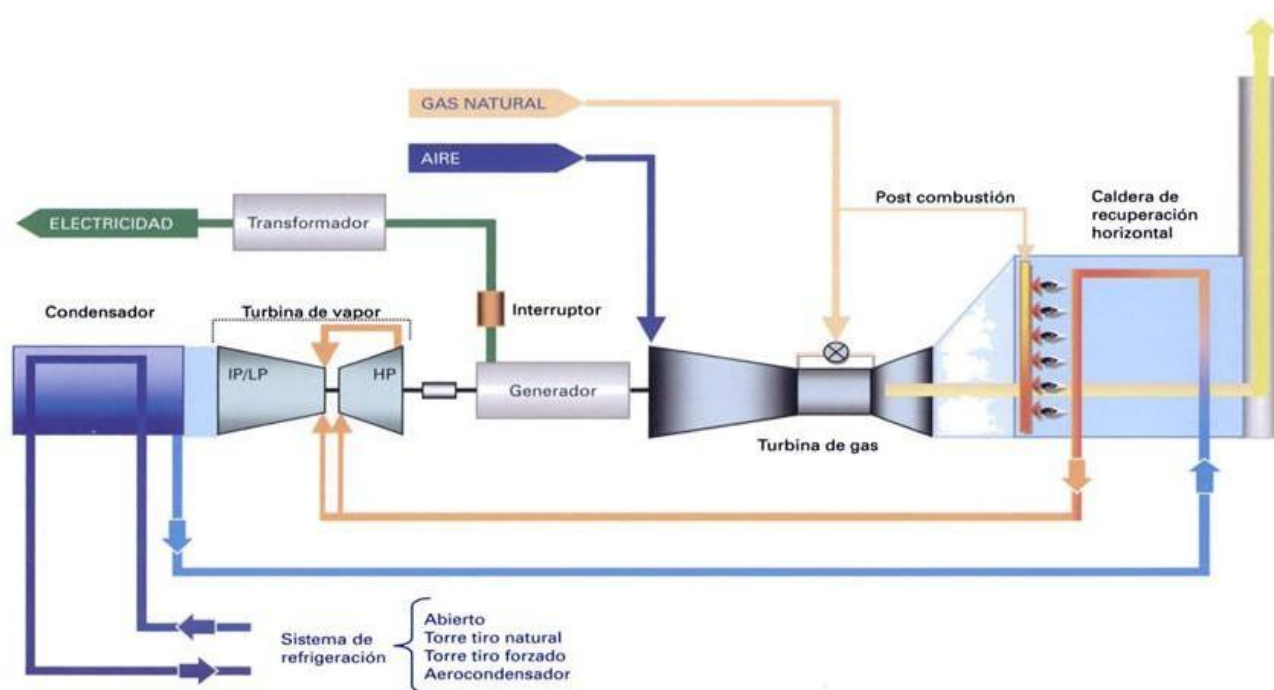


Nota: la imagen representa el proceso que sigue una central eléctrica a partir de sus componentes. Por Madariaga, 2024, p. 21. Desarrollos tecnológicos para la generación de energía nuclear de forma sostenible.

Esta figura es clave dentro de la investigación porque representa el funcionamiento básico de una central nuclear de agua a presión (PWR), que es el tipo de reactor más utilizado en el mundo para generar electricidad. Este sistema permite comprender el proceso mediante el cual la energía liberada por la fisión del uranio se transforma en electricidad, sin recurrir a la combustión de hidrocarburos. Su inclusión en este trabajo resulta relevante, ya que ilustra la base tecnológica que diferencia a la energía nuclear de las fuentes fósiles tradicionales, tanto en su eficiencia térmica como en la reducción de emisiones contaminantes.

Figura 2.

Proceso de ciclo combinado gas-vapor



Nota: La imagen muestra el esquema de funcionamiento de una central de Ciclo Combinado gas- vapor en una configuración de un solo eje (1×1 mono-eje), que es uno de los métodos más eficientes para generar electricidad usando hidrocarburos (Gas natural). Por Santiago Sabugal & Florentino Gómez, 2006, p. 85. Centrales térmicas de ciclo combinado.

La figura es importante dentro de esta investigación porque representa el esquema de una planta termoeléctrica de ciclo combinado, una de las principales tecnologías utilizadas para

la generación eléctrica a partir de gas natural. Este sistema integra una turbina de gas y una turbina de vapor para aprovechar mejor la energía térmica del combustible. Su inclusión en este trabajo resulta relevante porque permite comprender el funcionamiento de las centrales basadas en hidrocarburos y compararlo con el de los reactores nucleares, resaltando las diferencias en eficiencia energética, emisiones y sostenibilidad ambiental.

4. Identificar las variables que intervienen en la generación de energía eléctrica a partir de energía nuclear y los hidrocarburos. (Reserva, demanda y producción).

La generación de la energía a partir de la nuclear y de hidrocarburos es tres variables que intervienen como índices para su desarrollo. Hablar de reservas para la energía nuclear, es hablar del uranio disponible en la tierra. Según la revista *Uranium 2024: resources, production and demand*; para finales de 2022, las reservas mundiales de uranio se estimaban en 8 millones de tU (toneladas de uranio) a precios que no superaban los 260 US/Kg U. Esto con un 60% de recursos comprobados y un 40% de probables.

En la actualidad, Australia concentra la mayor cantidad de reservas de uranio a nivel mundial, con aproximadamente el 28 % de los recursos recuperables a un costo inferior a 130 USD por kilogramo de uranio (Kg U) y el 24 % de los recursos probables a precios inferiores a 260 USD/Kg U. Por su parte, Kazajistán y Canadá aportan cerca del 14 % y 10%, respectivamente, de los recursos identificados a precios inferiores a 130 USD/Kg U. (Nuclear Energy Agency, 2024).

A pesar de una ligera disminución en la capacidad instalada, la generación de energía nuclear presentó un aumento de un 2 % en 2023. No obstante, aún se mantiene por debajo de sus picos históricos. Su producción en 2023 fue 58 teravatios-hora menos que en 2019, antes de la pandemia, y un 2 % por debajo de su récord de producción de 2006 (Energy institute, 2024).

En Europa, la producción de energía nuclear disminuyó en un 1%. A pesar de la reactivación de plantas nucleares en Francia, que habían estado fuera de servicio por un periodo largo en 2022, debido al cierre de las últimas tres centrales que quedaban en Alemania a principios de este año. Por otro lado, China se mantiene a la cabeza en la construcción de

nuevas plantas nucleares desde el 2000 y es el responsable de casi el 60% de la construcción de toda la nueva capacidad nuclear a nivel mundial. “Japón ha ido reconstruyendo las unidades en servicio tras los hechos ocurridos en Fukushima en 2011. En 2023, aumentó en un 50% la producción” (Energy institute, 2024). A pesar de que China y Francia son grandes operadores, conocidos como la segunda y tercera flota más grande en el ámbito nuclear, Estados Unidos aún se mantiene firme y vigente con una producción relativamente estable, superando a estas dos potencias.

Las reservas mundiales de gas y petróleo son un indicador clave de la seguridad energética. Según el informe *Statistical Review Of World Energy* edición 2024, las reservas probadas de petróleo se mantuvieron estables en 2023, alcanzando un aproximado de 1,72 billones de barriles. Dominando la región de Oriente Medio con un 47,9% del total global. A nivel de países, Venezuela lidera como la mayor reserva mundial, aunque su producción es limitada y le siguen Arabia Saudita e Irán.

Rusia, Irán y Catar son los principales países con reservas de gas natural. Las reservas probadas de gas natural son considerables. “En 2023 las reservas mundiales de gas se estimaron en 183,3 billones de metros cúbicos” (Energy Institute, 2024, p. 21). Estas reservas están distribuidas diferente a las del petróleo, Oriente Medio y Europa son las regiones dominantes, que en conjunto concentran un 64.9% del total global. “Para el 2023 la producción mundial de petróleo alcanzó un nivel récord de algo más de 96 millones de barriles diarios” (Energy institute, 2024). El mayor productor sigue siendo Estados Unidos, con un crecimiento que es superior al 8%. Al contrario, por un año completo lleno de sanciones internacionales, la producción de Rusia disminuyó más de 1%.

Tras el COVID, países de América del Sur y de América Central registraron la tasa

incremental más alta de todas las regiones del 2023 de un 11%. China aumentó un 2% su producción, lo que representó alrededor de un 57% de la producción para la región Asia- Pacífico (Energy institute, 2024).

El consumo diario de petróleo ha superado la marca de los 100 millones de barriles por primera vez en la historia. Si bien el uso de combustibles como la gasolina, el diésel y el queroseno (para aviones) está regresando a los niveles de 2019 o incluso superándolos, los datos revelan variaciones significativas entre países y regiones. Según la revista *Statistical Review of World Energy* del 2024, el consumo mundial de gasolina (25 millones de barriles al día) ya sobrepasó ligeramente su nivel previo a la pandemia de 2019, el uso de queroseno, a pesar de haber tenido un fuerte crecimiento en 2023 (17.5%), aún no alcanza su pico de 2019.

La producción de petróleo de países no pertenecientes a la OPEP superó el crecimiento incremental de la demanda mundial en un 20% en 2023” (Energy institute, 2024), “Por otro lado, el gas natural mantuvo una demanda casi igual a la presentada en el 2023. Presentando solo un aumento de 1000 millones de metros cúbicos (Energy institute, 2024, p. 36).

Sin embargo, esto no fue suficiente para recuperar pérdidas que se registraron un año antes, cuando se situó abajo la demanda. “Cayo 0,4% representando unos 15000 millones de metros cúbicos de gas. Para Europa se vio el mismo caso, donde la demanda de gas cayó en un 7% (34 millones de metros cúbicos de gas) para 2023, no ocurría desde 1994” (Energy institute, 2024). Esto está impulsado por las caídas que presentaron los principales países productores de la región (Noruega, Reino Unido y Países Bajos).

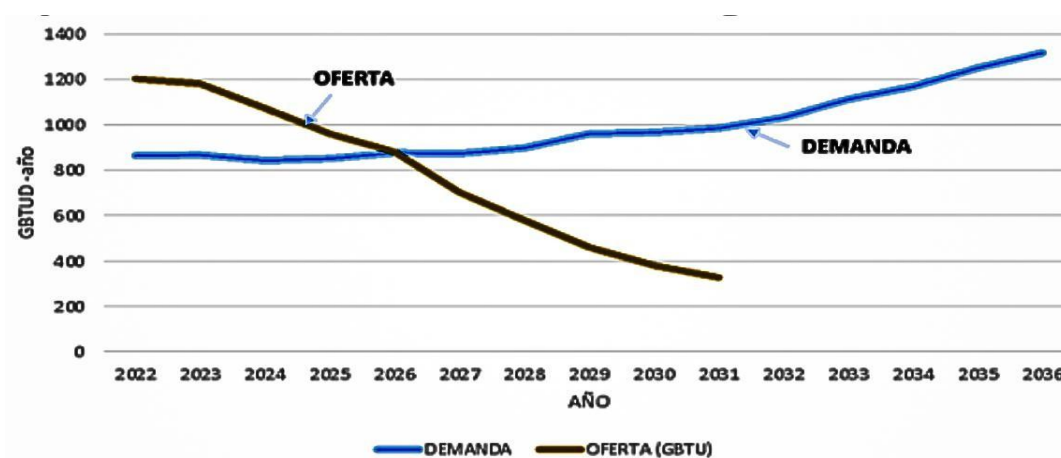
A medida que la región Asia-Pacífico experimenta un crecimiento en la demanda de gas, impulsado por China e India, el panorama global del mercado energético continúa

transformándose. Esta tendencia contrasta con la situación en Europa, donde la Unión Europea ha reducido de forma notable su dependencia del gas ruso. Según el Energy Institute (2024), en un periodo de solo dos años las importaciones de gas desde Rusia disminuyeron del 45 % al 24 % en 2022 y al 15 % en 2023, ubicando a Rusia por detrás de Noruega y, especialmente, de los Estados Unidos como proveedor.

Este cambio refleja el ascenso de Estados Unidos como potencia energética global, impulsado principalmente por el crecimiento de sus exportaciones de gas natural licuado (GNL). En poco más de una década, las exportaciones de GNL de Estados Unidos pasaron de ser prácticamente inexistentes a dominar el mercado, superando a gigantes como Qatar y Australia y reconfigurando así las dinámicas del suministro energético a nivel mundial.

Figura 3.

Pronóstico de demanda 2022-2026 vs oferta 2022-2031



Nota: Se observa que la oferta de gas natural apenas cubre la demanda hasta 2026. Obtenida de Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), 2023.

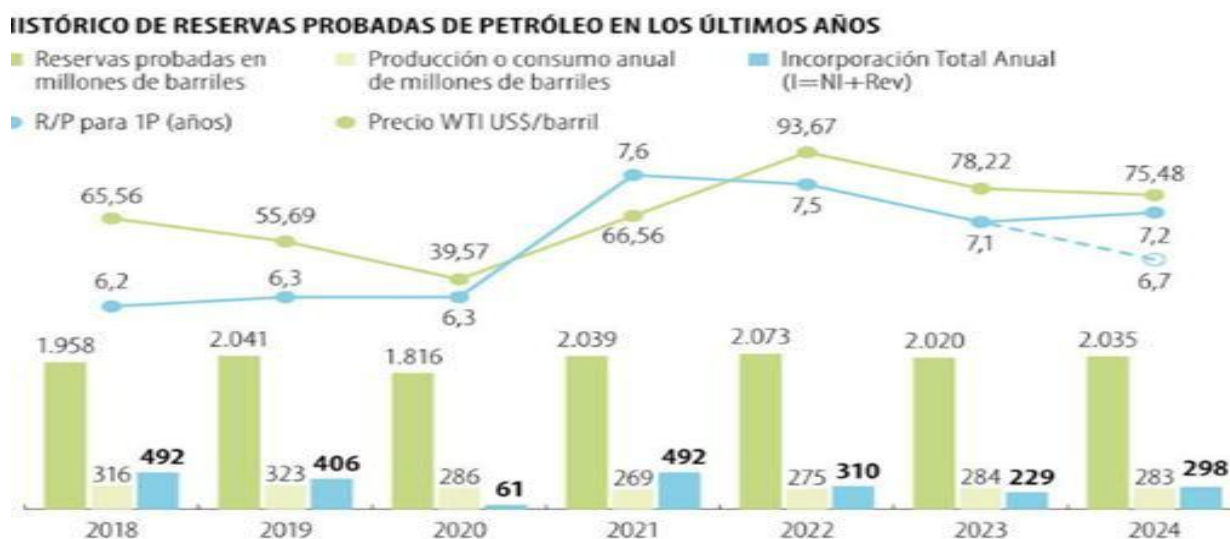
La figura 3, del *pronóstico de demanda 2022-2026 vs oferta 2022-2031*, muestra la evolución proyectada de la oferta y la demanda de gas natural entre 2022-2036. Mientras la demanda (línea azul) presenta una tendencia creciente a lo largo de los años, la oferta (línea

marrón) evidencia una disminución sostenida. A partir de 2024 aproximadamente, se identifica un punto de cruce donde la demanda supera la oferta, marcando el inicio de un déficit en el suministro de gas natural. Este comportamiento indica que, de mantenerse las condiciones actuales de producción y consumo, el país podría enfrentar problemas de abastecimiento energético en el mediano y largo plazo.

La relevancia de esta figura dentro de esta investigación radica en que evidencia la necesidad de diversificar la matriz energética y fortalecer las fuentes alternativas, como la energía nuclear, para garantizar la seguridad energética futura. Además, respalda el análisis comparativo entre diferentes fuentes de energía, destacando la importancia de planificar con anticipación ante la reducción de las reservas y la creciente demanda.

Figura 4.

Reservas probadas de petróleo



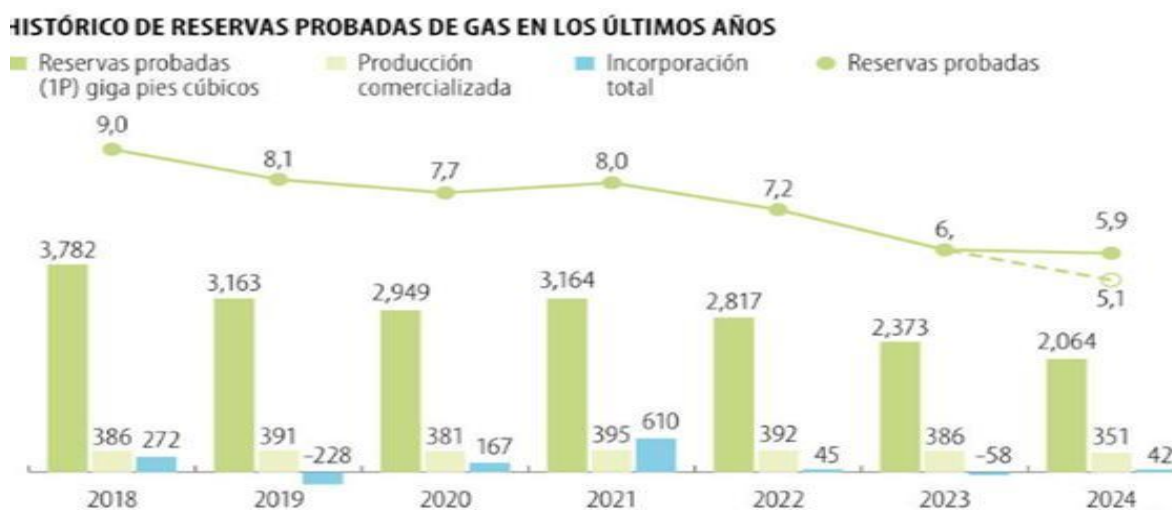
Nota: Fuente de la ANH y publicado en el diario la república en mayo del 2025

La figura 4, de *reservas probadas de petróleo*, nos indica que las reservas probadas (barra verde) han mostrado una tendencia estable pero ligeramente descendente desde 2018,

pasando de 1.958 millones de barriles a 2.035 millones en 2024. La producción anual (barras azules) ha disminuido gradualmente, reflejando una reducción en el ritmo de extracción. El indicador R/P, que expresa los años de duración de las reservas al ritmo actual de producción, se ha mantenido entre 6 y 7,6 años, lo que indica que, de no incorporarse nuevos hallazgos o tecnologías, las reservas podrían agotarse en menos de una década. El precio del petróleo WTI (línea verde) ha presentado variaciones significativas, con un repunte entre 2020 y 2022, influido por factores económicos globales y de oferta y demanda. Esta figura es relevante para la investigación porque permite evaluar la sostenibilidad de la producción petrolera en el tiempo y evidencia la vulnerabilidad del sector de hidrocarburos ante la disminución de reservas y la volatilidad del mercado internacional. Estos datos respaldan la necesidad de buscar fuentes energéticas más sostenibles y de menor impacto ambiental como la energía nuclear.

Figura 5.

Reservas probadas de gas



Nota: Fuente de la ANH y publicado en el diario la república en mayo del 2025

Las reservas probadas (barras verdes) presentan una disminución constante desde 2018,

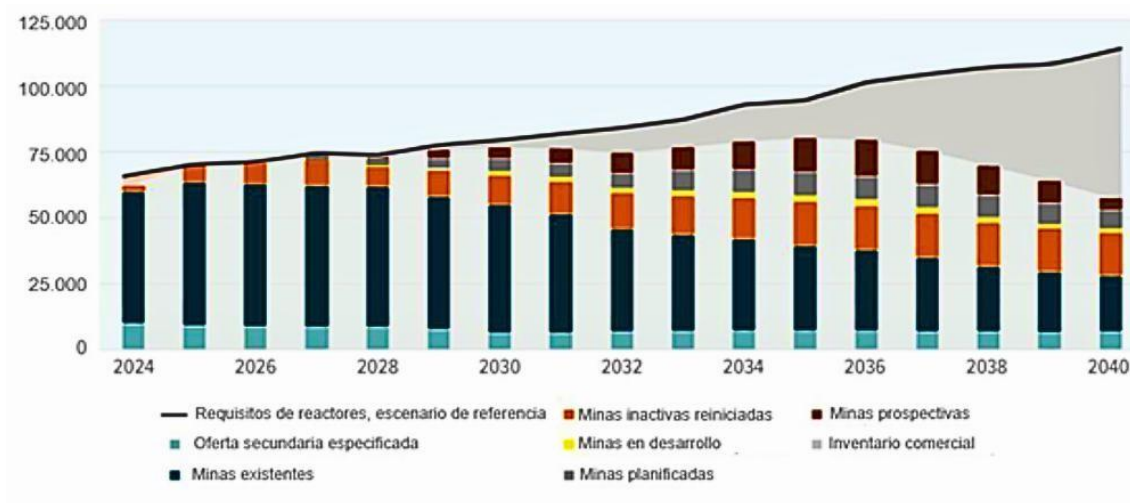
pasando de 3.782 GPC a 2.064 GPC en 2024. La producción comercializada (barras amarillas) se ha mantenido relativamente estable, pero con ligeras variaciones que muestran un consumo sostenido del recurso. La incorporación total de reservas (barras azules) ha sido insuficiente en los últimos años, e incluso negativa en 2023 y 2024, lo que significa que no se están reemplazando las reservas al ritmo de explotación.

El indicador R/P ha descendido de 9 años en 2018 a 5,9 años en 2024, evidenciando que el país podría enfrentar una reducción significativa en su autosuficiencia gasífera en menos de una década si no se descubren nuevos yacimientos o se diversifica la matriz energética.

En la figura 5 *Reservas probadas de gas* indican una tendencia decreciente en la disponibilidad de gas natural, una de las principales fuentes de energía del país. Este panorama justifica la búsqueda de nuevas alternativas que garanticen la estabilidad del suministro energético y reduzcan la dependencia de los hidrocarburos como lo es la energía nuclear.

Figura 6.

Proyectos de oferta y demanda de uranio y escenarios de referencia.



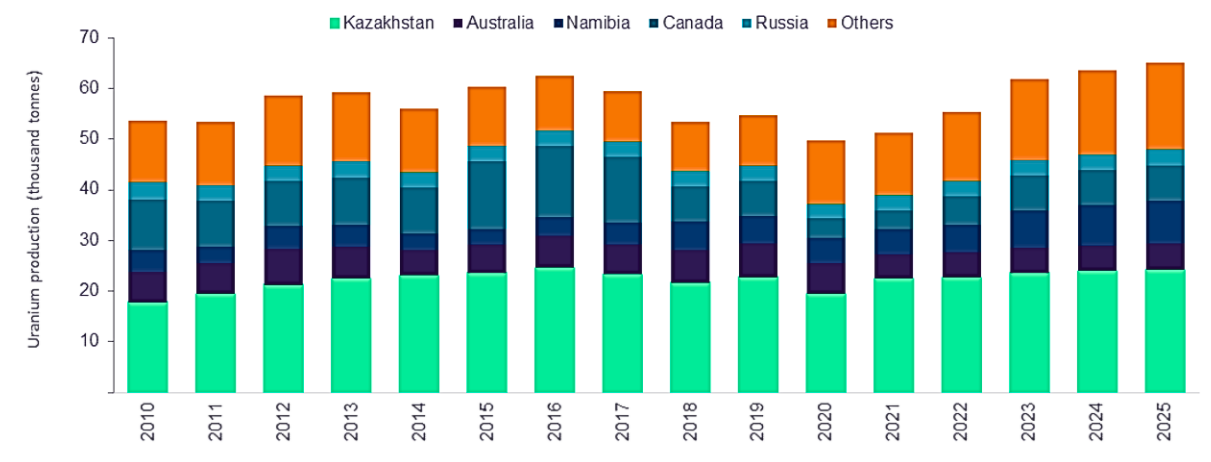
Nota: Sacado de la Asociación nuclear mundial el 6 de octubre de 2022

La figura nos indica la proyección del suministro mundial de uranio frente a los

requerimientos de los reactores nucleares en un escenario de referencia entre 2024 y 2040. En ella se comparan distintas fuentes de abastecimiento, incluyendo minas existentes, minas planificadas, minas en desarrollo, minas inactivas reiniciadas, minas prospectivas, oferta secundaria e inventarios comerciales.

En los primeros años (2024-2030), la producción de uranio proveniente de minas existentes cubre la mayor parte de la demanda global. Sin embargo, hacia 2035 en adelante, la demanda de uranio (línea gris superior) aumenta de forma significativa, mientras que la oferta proveniente de minas actuales comienza a disminuir. Para compensar este déficit, se prevé un mayor aporte de minas planificadas, en desarrollo y prospectivas, junto con el uso de inventarios comerciales. A pesar de ello, la proyección muestra que será necesario ampliar la capacidad minera y explorar nuevos yacimientos para satisfacer los requerimientos futuros de los reactores nucleares.

Esta figura de *proyectos de oferta y demanda de uranio y escenarios de referencia* es relevante porque demuestra que, aunque la energía nuclear ofrece una alternativa sólida frente al agotamiento de los hidrocarburos, su sostenibilidad también depende de la planificación y expansión del suministro de uranio. Además, evidencia que la demanda nuclear crecerá significativamente en las próximas décadas, lo cual refuerza la importancia de desarrollar tecnologías más eficientes de aprovechamiento del combustible y de gestión del ciclo nuclear para garantizar la seguridad energética global a largo plazo.

Figura 7.*Producción de uranio (miles de toneladas) en lugares clave a nivel mundial**Nota: tomado de global data Mining Intelligence Center- publicado en el diario mining press de argentina 2025*

La figura muestra la producción mundial de uranio entre 2010 y 2025, expresada en miles de toneladas, desglosada por los principales países productores: Kazajistán, Australia, Namibia, Canadá, Rusia y el grupo Otros. Kazajistán (color verde claro) se mantiene como el principal productor mundial de uranio a lo largo de todo el periodo, aportando cerca del 40% de la producción total global. La producción total muestra fluctuaciones moderadas, con una ligera caída entre 2017 y 2020, seguida de una recuperación progresiva desde 2021 hasta 2025, alcanzando nuevamente niveles cercanos a las 65 mil toneladas anuales.

La figura de *producción de uranio (miles de toneladas) en lugares clave a nivel mundial* es relevante porque evidencia la concentración geográfica de la producción de uranio, lo que puede generar dependencia de unos pocos países para el abastecimiento del combustible nuclear. Este aspecto es clave al analizar la viabilidad de la energía nuclear como alternativa a los hidrocarburos, ya que pone de manifiesto la importancia de la seguridad en el suministro de uranio, la necesidad de diversificar las fuentes de producción y de fortalecer la cooperación internacional para garantizar la estabilidad del mercado energético a largo plazo.

5. Definición del impacto ambiental que genera el uso de energía nuclear y su comparación con los hidrocarburos

“La evaluación del impacto ambiental de las fuentes de energía es fundamental para la toma de decisiones estratégicas en el contexto de la mitigación del cambio climático y la búsqueda de un desarrollo sostenible”. (BID, 2008, p.30). La creciente demanda energética a nivel mundial se enfrenta a un desafío sin precedentes: la necesidad imperiosa de mitigar el cambio climático, un fenómeno exacerbado en gran medida por la quema de combustibles fósiles. “Esta coyuntura global ha impulsado una reevaluación crítica de las fuentes de energía existentes y emergentes, con un enfoque particular en su impacto ambiental a lo largo de todo su ciclo de vida” (García, 2023).

La energía nuclear se distingue por sus bajas emisiones de dióxido de carbono (CO₂) durante la operación y a lo largo de su ciclo de vida completo, lo que la posiciona como una opción fundamental para la descarbonización (Romero, 2025, p. 26).

Sin embargo, enfrenta desafíos considerables en la gestión de residuos radiactivos de muy larga vida, que persisten por cientos de miles de años. “En términos de impacto en la salud pública, la quema de gas y la extracción de crudo causan significativamente una mayor contaminación del medio ambiente que la energía nuclear” (BID, 2008).

5.1. Impacto Ambiental de la energía nuclear

La energía nuclear, reconocida por su capacidad de generar electricidad a gran escala sin emisiones directas de gases de efecto invernadero durante su operación, presenta una serie de impactos ambientales a lo largo de su complejo ciclo de vida (Cesarz, 2023). Este tipo de energía en sí no emite gases de efecto invernadero, por lo que se podría decir que la energía

nuclear no afecta al cambio climático global. Sin embargo, “los residuos nucleares son difíciles de gestionar y los accidentes, así como la amenaza del terrorismo, son motivo de gran preocupación” (Cesarz, 2023).

El agua es un componente indispensable para el funcionamiento de las centrales nucleares, siendo utilizada en grandes volúmenes para los sistemas de refrigeración, ya sean de circuito cerrado o abierto. Si bien no se "consume" el agua en el sentido de agotarla, su utilización implica la captación de grandes caudales y la descarga de agua a una temperatura ligeramente superior a la de la fuente, lo que puede tener un impacto térmico localizado en los ecosistemas acuáticos (García-Ruiz, 2004). La baja emisión de GEI durante la operación es el principal argumento ambiental a favor de la energía nuclear en la lucha contra el cambio climático.

5.2. Ciclo de vida de la energía nuclear

El ciclo nuclear es un proceso industrial complejo que se inicia con la extracción del uranio y culmina con la disposición final de los desechos nucleares, con cada etapa presentando implicaciones ambientales específicas. “El ciclo de combustible nuclear es fundamental para una evaluación completa de la huella ambiental, la minería de uranio puede generar diversos impactos negativos en el medio ambiente” (Cesarz, 2023). Estos incluyen la liberación de radiación, la contaminación del entorno circundante (Agua y suelo) con productos químicos.

También la etapa de gestión de residuos que son peligrosos para la salud y el medio ambiente y que permanecen radiactivos durante cientos de miles de años. “Estos residuos se clasifican generalmente en tres categorías: residuos de baja actividad (LLW), de actividad intermedia (ILW) y de alta actividad (HLW)” (Tartera & Gonçalves, 2018).

Uno de los mayores desafíos en la gestión de residuos radiactivos es encontrar y

desarrollar lugares adecuados para el almacenamiento a largo plazo de los HLW. Los repositorios geológicos profundos, diseñados para contener los residuos bajo tierra, son la solución propuesta a nivel global. No obstante, su desarrollo se ve obstaculizado por preocupaciones sobre la estabilidad geológica, la posible contaminación de las aguas subterráneas y la fuerte oposición de las comunidades locales (Tartera & Gonçalves, 2018).

El desmantelamiento y clausura de las centrales nucleares son procesos complejos y costosos, implican trabajar en un entorno de radiaciones y grandes volúmenes de materiales residuales, muchos de los cuales están contaminados o activados radiactivamente.

Los objetivos principales del desmantelamiento son acondicionar el emplazamiento para su utilización sin restricciones a largo plazo y desmantelar las instalaciones de manera segura y sin impacto al medio ambiente y con eficiencia económica.

5.3. Impacto ambiental de los hidrocarburos

Los hidrocarburos son combustibles fósiles ampliamente utilizados alrededor del mundo como generadores fundamentales de diversas formas de energía. Sin embargo, es posible que en su extracción se genere contaminación en agua y suelos. Durante las operaciones de explotación, extracción y transporte, los materiales pueden contaminar el medio ambiente circundante a través de filtraciones accidentales o deliberadas. “De esta manera, durante las últimas décadas los hidrocarburos han dado lugar a una amplia liberación de contaminantes en el medio ambiente” (Velasquez, 2017, p.151).

Los derivados de los hidrocarburos no solo impactan la capa superficial del suelo, sino también corren el riesgo de ser movilizados hasta aguas subterráneas, generando así su contaminación, “Los derrames accidentales a gran escala también representan un volumen significativo de contaminantes en todo el mundo” (Velasquez, 2017).

5.4. Ciclo de vida de los hidrocarburos

El ciclo de vida de los hidrocarburos abarca desde su formación geológica hasta su utilización como combustibles o materias primas, incluyendo la exploración, extracción, procesamiento, transporte, refinación y finalmente su consumo o desecho. Este ciclo también considera los aspectos ambientales que se generan durante toda la fase del ciclo y los impactos que estos generan al medio ambiente.

Toda la fase de extracción, exploración y producción es una fuente importante de impactos ambientales directos y localizados. “Todas las operaciones requieren la apertura de caminos y la construcción de infraestructuras. Esto conduce a la deforestación de grandes extensiones de bosque, resultando en la pérdida de biodiversidad y la fragmentación de hábitats” (Ariza, 2024). También las actividades en estas fases pueden provocar fugas y la descarga de aguas residuales de diversos procesos, contaminando ríos, lagos y océanos con hidrocarburos, metales pesados y otros productos químicos y tóxicos. “Esta contaminación en estas etapas del ciclo de vida de los hidrocarburos afecta gravemente la vida acuática, daña los ecosistemas y pone en riesgo la salud de las comunidades que dependen de estas fuentes de agua” (Ariza, 2024). Igualmente, la reinyección de aguas de formación en pozos también presenta un riesgo de contaminación para los acuíferos.

En la etapa donde los hidrocarburos se distribuyen y venden al consumidor para su uso correspondiente en la sociedad, es una de las etapas que representa el mayor impacto de los hidrocarburos en términos de contribución al cambio climático a nivel global y a la contaminación atmosférica a nivel local (Ariza, 2024).

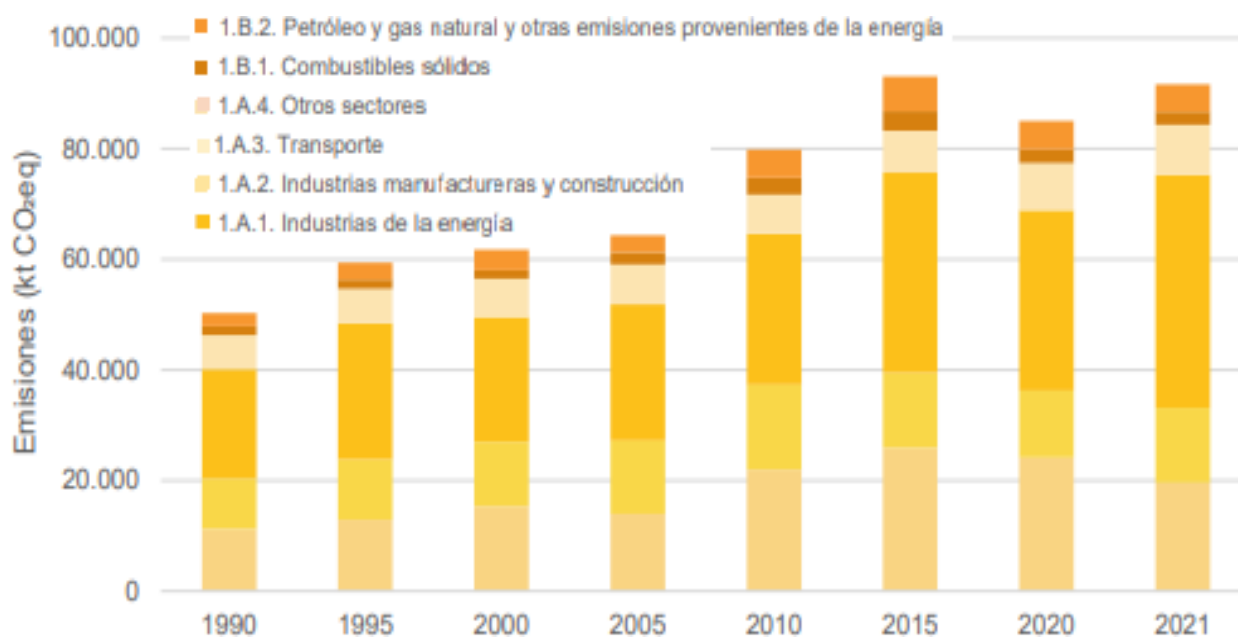
La quema de combustibles fósiles es la principal fuente de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y metano al medio ambiente, que son los dos GEI primarios que atrapan el

calor en la atmósfera y provocan el calentamiento global y cambio climático.

Para Colombia el módulo de energía resalta las emisiones de CO₂ asociadas en mayor proporción a los procesos de quema de combustibles con fines energéticos, los cuales aportan el 90,79 % de las emisiones para la vigencia 2021. Por su parte, el CH₄ aporta el 7,89 % de las emisiones del 2021, las cuales se encuentran asociadas principalmente a las emisiones fugitivas (IDEAM, 2021).

Figura 8.

Evolución de emisiones del módulo de energía (1990-2021)



Fuente: IDEAM, 2021, P. 35. Inventario Nacional de Emisiones y Absorciones Atmosféricas de Colombia

La figura muestra la evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero del sector energético colombiano entre 1990 y 2021. Se observa un incremento sostenido asociado principalmente al consumo de combustibles fósiles, en especial petróleo y gas natural. Este comportamiento evidencia la alta dependencia del país de fuentes no renovables y su contribución al cambio climático. La figura resulta fundamental dentro de este estudio, pues

permite contrastar la huella ambiental del sistema energético actual con la baja emisión de carbono que caracteriza a la energía nuclear, reforzando la necesidad de avanzar hacia una transición energética sostenible.

5.5. Comparativa ambiental entre la energía nuclear e hidrocarburos

Los hidrocarburos presentan emisiones de CO2 sustancialmente más altas. Según datos del Global Carbón Project, las emisiones de combustibles fósiles alcanzaron un récord de 37.400 millones de toneladas de CO2 en 2024. La energía nuclear se distingue por ser la fuente con las emisiones de CO2 más bajas en todo su ciclo de vida, con un rango de 5.1 a 6.4 gramos de CO2 por kWh generado (García, 2023).

Tabla 2.
Comparación de emisiones de CO2 por energía

Características	Energía Nuclear	Energía de hidrocarburos
Fuente principal	Fisión de uranio/plutonio	Combustión de gas, petróleo
Emisiones de Carbono	Muy bajas (12 gCO2eq/kwh)	Altas (490-820 gCO2eq/kwh)
Tecnologías claves	Reactores (PWR, BWR)	Turbinas de gas, plantas termoeléctricas, reforma de metano
Residuos	Radioactivos, gestionados	CO2, NOx, SOx, partículas
Seguridad	Riesgos de accidentes graves, pero tiene más seguridad	Riesgos de explosiones, contaminación crónica
Costos	Alta inversión inicial, bajo costo operativo	Inversión y operaciones variables, alto costo ambiental
Disponibilidad	Energía de base, continua	Flexible, respuesta rápida

Nota: la tabla fue elaborada propia, pero los datos se sacaron del IPCC (panel intergubernamental sobre cambio climático 2021).

5.6. Generación y gestión de residuos

La diferencia fundamental en la generación de residuos entre la energía nuclear y los hidrocarburos radica en la naturaleza, el volumen y la persistencia de estos. “La energía nuclear genera residuos radiactivos clasificados por su nivel de actividad (baja, intermedia, alta)”

(Madariaga Martinez, 2024). La gestión de estos residuos es un desafío técnico, económico y político considerable debido a su toxicidad y la necesidad de contención a muy largo plazo. Por otro lado, los hidrocarburos generan volúmenes masivos de residuos sólidos y líquidos, “Los procesos de refinación y extracción de petróleo y gas generan diversos residuos peligrosos, incluyendo lodos aceitosos, catalizadores agotados (que contienen metales pesados), solventes y aguas residuales contaminadas” (Velasquez, 2017).

Tabla 3.
Comparativa de residuos generados

Fuente de energía	Naturaleza del residuo principal	Volumen relativo (masa)	Peligrosidad/desafío principal	Persistencia
Energía nuclear	Residuos radioactivos (LLW, ILW, HLW)	Muy bajo	Alta radiactividad, gestión a largo plazo (miles de años)	Cientos de miles de años
Petróleo/gas natural	Lodos aceitosos, catalizadores agotados, salmuera, (Fracking) residuos químicos	Alto	Toxicidad química, metales pesados, radiactividad, (fracking)	Variable pero persistente en el ambiente

Nota: la tabla fue elaborada por mí, pero los datos se sacaron de la International Energy Agency (IEA).

5.7. Normas para el uso de la energía nuclear en Colombia

El licenciamiento, aceptación pública, gestión de residuos y competitividad. El licenciamiento regula cómo y en qué condiciones se pueden desarrollar instalaciones nucleares, asegurando cumplimiento técnico, legal y de seguridad. La gestión de residuos norma cómo deben manejarse, transportarse y eliminar los materiales radiactivos de manera segura. La aceptación pública se relaciona con la transparencia, participación ciudadana y responsabilidad ambiental, clave para una propuesta de energía nuclear viable. La competitividad se vincula a la política energética nacional, al marco regulatorio que permite que la energía nuclear pueda

competir o integrarse como opción sostenible frente a los hidrocarburos. (Tobon, 2020).

5.8. Licenciamiento

Resolución 18-1475 de 2004 (expedida por el Ministerio de Minas y Energía): Establece los requisitos para la obtención de licencias de operación, parada prolongada, modificación y desmantelamiento de instalaciones nucleares. Resolución 18-1419 de 2004: Reglamenta el procedimiento para la expedición de licencias de importación de materiales radiactivos para usos médicos, industriales, agrícolas, docentes, etc. Decreto 381 de 2012: Asigna al Ministerio de Minas y Energía la competencia para formular la política nacional en materia de energía nuclear y materiales radiactivos, así como dictar normas y reglamentos para la gestión segura de éstos.

5.9. Gestión de residuos

Resolución 18 0005 de 2010 del min-energía: Reglamento para la gestión de los desechos radiactivos en Colombia. Resolución 40306 de 2024 del min-energía: Reglamenta el transporte seguro de materiales radiactivos en Colombia, incluyendo modalidades terrestre, aérea y acuática.

5.10. Aceptación pública

Aunque no se especifica una norma única que regule exclusivamente la “aceptación pública” de instalaciones nucleares, el marco normativo exige cumplimiento de convenios internacionales, protección radiológica, transparencia y participación ciudadana. Por ejemplo, la norma donde se incluyen derechos de acceso a la información y cultura de seguridad en temas nucleares. La normativa ambiental general del país también establece que para proyectos que afectan recursos naturales y tecnología nuclear pueden requerirse procesos de audiencia

pública y participación ciudadana. (resolución 921 de 2025).

5.11. Competitividad

En cuanto al uso de la energía nuclear como parte de la matriz energética, existen políticas y directrices del Ministerio de Minas y Energía bajo el “Capítulo – Políticas y Directrices Relacionadas con la Energía Nuclear”. Aunque el marco específico para competitividad de la energía nuclear no está tan detallado como para las fuentes renovables, la normativa establece que el Estado formulará políticas para la energía nuclear, lo cual abre el espacio regulatorio para su integración competitiva en la matriz energética.

6. Comparación del potencial energético de la generación de energía eléctrica a partir de la energía de los hidrocarburos y la energía nuclear

El potencial energético de una fuente se define por la magnitud de sus reservas y la densidad de energía que puede extraerse de su combustible. “Estos factores son cruciales para determinar la viabilidad a largo plazo y la capacidad de contribución a la matriz energética global” (Aguilar, 024). En los últimos 10 años, la generación mundial de electricidad ha crecido en promedio alrededor de un 2,6% anual, aproximadamente el doble de la tasa de la demanda total de energía.

La demanda total de energía aumentó en todas las regiones, pero el crecimiento estuvo lejos de estar distribuido de manera uniforme, lo que refleja marcadas variaciones regionales determinadas por el desarrollo económico, las condiciones climáticas y la política energética (EI, 2025).

6.1. Hidrocarburos

Los hidrocarburos, que incluyen el gas natural y el petróleo, han sido durante décadas, junto al carbón, la principal fuente de energía a nivel mundial debido a su abundancia y relativa facilidad de extracción y transporte (Ariza, 2024). Las reservas globales de hidrocarburos son un indicador fundamental de su disponibilidad futura, La producción mundial de gas natural ascendió a 4.124 billones de metros cúbicos (bcm), siendo los mayores productores Estados Unidos, Rusia, Irán y China, que juntos representaron el 53% de la producción mundial total. “En los últimos diez años, China ha pasado de ser el sexto mayor productor de gas del mundo al cuarto. Su producción nacional cubre actualmente el 56% de su demanda interna” (EI, 2025).

La demanda mundial de gas natural volvió a crecer en 2024, con un aumento de 113

billones de metros cúbicos (bcm), es decir, un 2,5%. Su participación en los combustibles fósiles mundiales se situó en el 29% y satisfizo una cuarta parte de la demanda energética mundial total (EI, 2025). Todas las regiones, excepto África, experimentaron un aumento de la demanda de gas en 2024. Asia Pacífico registró el mayor incremento, de 45 billones de metros cúbicos (bcm), de los cuales China representó casi el 70 %. La Comunidad de Estados Independientes (CEI) y América del Norte experimentaron aumentos de 25 (bcm) y 18 (bcm) respectivamente, mientras que Europa experimentó un modesto aumento de 7 (bcm) (EI, 2025).

El petróleo sigue siendo la principal fuente de energía, cubriendo el 34% de la demanda mundial total en 2024. “Si bien se está desacelerando, la demanda mundial aumentó un 0,6% y superó el nivel de 101 Mbbl/d por primera vez en la historia” (EI, 2025). La demanda de la OCDE se mantuvo estable en 45 Mbbl/d, mientras que la demanda de los países no pertenecientes a la OCDE creció 0,7 Mbbl/d. África y Oriente Medio fueron las regiones de más rápido crecimiento, con un 2,5 % y un 1,7 %, respectivamente, la demanda mundial de fueloil y diésel/gasóleo cayó un 2% y un 0,5%, respectivamente (EI, 2025). “Esto se debió principalmente a China, donde el aumento de camiones propulsados por GNL redujo la demanda de diésel, a nivel mundial, aumentó la demanda de queroseno para aviación (0,4 Mbbl/d), etano y GLP (0,4 Mbbl/d) y gasolina (0,3 Mbbl/d)” (EI, 2025).

6.2. Energía nuclear

La energía nuclear se distingue por su extraordinaria densidad energética, lo que la convierte en una fuente de energía muy potente, a pesar de que sus combustibles primarios, el uranio y el torio, no son tan abundantes como los hidrocarburos en términos de masa. Las reservas de uranio son el pilar de la energía nuclear actual. Los recursos identificados de uranio

recuperables a un costo de hasta \$130/kg de uranio ascendían a un total de 5,925,700 toneladas métricas a nivel mundial.

Australia posee la mayor parte de estas reservas, con un 28%, seguida por Kazajistán (14%) y Canadá (10%) (Semenova Mirkhusanov, 2024). Las proyecciones sugieren que las reservas de uranio identificadas podrían agotarse para 2080 si el consumo continúa al ritmo actual, impulsado por un aumento del 50% anual en la inversión en energía nuclear desde 2020 y una expectativa de incremento del 130% en la capacidad nuclear para 2050 (Semenova Mirkhusanov, 2024). La densidad energética del combustible nuclear es incomparable con la de los combustibles fósiles. Un kilogramo de uranio-235 puede generar aproximadamente 24.000.000 kWh de calor mediante fisión completa, lo que representa entre dos y tres millones de veces la energía contenida en un kilogramo de petróleo o carbón.

Esta asombrosa diferencia en densidad energética significa que se necesita una cantidad mínima de combustible nuclear para producir una inmensa cantidad de electricidad (Cesarz, Analisis economico y medio ambiental de la energia nuclear, 2023). Sin embargo, es importante considerar la eficiencia del ciclo del combustible nuclear. En los reactores de agua ligera (LWR) tradicionales, solo se extrae aproximadamente del 5% al 7% de la energía del combustible. Además, debido al proceso de enriquecimiento, solo se utiliza alrededor del 1% de la energía del recurso minado (Cesarz, Analisis economico y medio ambiental de la energia nuclear, 2023).

6.3. Costos de generación eléctrica

La evaluación de los costos de generación eléctrica es un componente crítico para la toma de decisiones energéticas, abarcando desde la inversión inicial hasta los gastos operativos y de gestión de residuos.

6.4. Costos de capital (CAPEX)

Los costos de capital iniciales para la construcción de centrales eléctricas varían significativamente entre las tecnologías de combustibles fósiles y la nuclear. Para el gas natural, los costos de la inversión inicial son más bajos en comparación con una planta nuclear, mientras los costos operativos pueden ser más elevados y sujetos a la volatilidad de los precios de los combustibles en los mercados internacionales. Por ejemplo,

el Coste nivelado de la energía LCOE para el gas natural es de aproximadamente 75 dólares por megavatio-hora 75 \$US/MWh. Las turbinas de combustión de ciclo simple tienen un rango de costo de US\$836/kW a US\$1,606/kW, dependiendo del tipo (por ejemplo, aeroderivadas o de clase H). Las plantas de ciclo combinado (CCGT), que son más eficientes, presentan costos de capital de US\$868/kW a US\$921/kW (Figuerola, 2022).

Sin embargo, la adición de captura de carbono al 95% en una planta de ciclo combinado aumenta significativamente el CAPEX a US\$2,365/kW. En términos generales, el costo de capital de una nueva turbina de gas grande se aproxima a los US\$1,000/kW.

La energía nuclear se caracteriza por tener los costos de inversión inicial más elevados; los costos oscilan entre 6 y 10 millones de dólares para la construcción de una planta nuclear. Pero el coste nivelado de la Energía LCOE es menor a la de los hidrocarburos, en 2025 el LCOE para nuevas plantas nucleares estará entre 55-95 dólares por megavatio-hora 55-95\$US/MWh. Un reactor nuclear avanzado tiene un costo de capital de US\$7,861/kW. Los pequeños reactores modulares (SMR), aunque prometen ser más económicos a largo plazo, aún presentan altos costos iniciales, con estimaciones de US\$8,936/kW para un conjunto de 6 SMR de 80 MW (Juarez Luna, 2020).

La agencia internacional de la energía (IEA) estima que los costos iniciales (overnight costs) de los SMR en la UE para 2025 rondarán los \$US10,000/kW, en comparación con los \$6,600/kW de la energía nuclear tradicional. Las proyecciones sugieren que, a pesar de las expectativas de reducción de costos con la producción en serie, los costos de capital de los SMR podrían seguir siendo aproximadamente un tercio más altos que los de la energía nuclear convencional incluso para 2050. La complejidad tecnológica, los estrictos requisitos de seguridad y regulatorios, y los largos plazos de construcción son los principales factores que contribuyen a estos elevados costos de capital en la energía nuclear.

6.5. Costos de operación y mantenimiento (O&M)

Los costos de operación y mantenimiento pueden dividirse en costo fijo y variable; estos varían dependiendo de la inversión inicial, según el National Renewable Energy Laboratory (NREL) los costos de O&M para tecnologías fósiles se dividen en: Fixed O&M (FOM) y variable O&M (VOM). El FOM incluye personal de operación, mantenimiento, supervisión, administración, seguros, impuestos.

El VOM incluye consumibles no combustibles, materiales de mantenimiento, gestión de residuos, etc.

Una central térmica de gas natural combinado tiene un FOM aproximado de US\$10.100/MW-año, y un VOM de aproximadamente US\$ 2.02/MWh. Una planta térmica de petróleo tiene un FOM aproximado de US\$11.110/MW-año y un VOM de aproximadamente US\$ 3.54/MWh

La energía nuclear muestra un perfil de costos de O&M distinto. En 2023, el costo total promedio de generación para la energía nuclear fue de \$31.76 por MWh. De este total, los costos de operación representaron US\$19.38 por MWh. Los costos de

operación y mantenimiento (O&M) se dividen en fijos y variables. Los costos fijos de O&M para grandes reactores oscilan entre \$136.000 y US\$219.000 por MW-año, siendo principalmente impulsados por la mano de obra. Los costos variables de O&M para grandes reactores se sitúan entre US\$11.00 y US\$14.75 por MWh. Para los SMR, los costos fijos de O&M varían de US\$127.000 a US\$232.000 por MW-año, y los costos variables de O&M de US\$12.25 a US\$14.75 por MWh. (IEA, 2024).

Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y contaminación atmosférica

Las centrales eléctricas de petróleo emiten grandes volúmenes de dióxido de carbono (CO₂), dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), partículas y mercurio. El carbón emite más del doble de CO₂ por kilovatio-hora que el gas natural. Específicamente, una central eléctrica de carbón produce 850 kg de CO₂ por MWh. El gas natural, si bien es un combustible fósil, se considera una alternativa más limpia al petróleo, Su combustión produce menos contaminantes como NO_x, SO_x y partículas en comparación con el carbón y el petróleo.

Sin embargo, las centrales de gas natural producen una cantidad considerable de CO₂, aunque en menor medida que las de carbón. Se estima que una central de gas produce 185 kg de CO₂ por MWh. Las nuevas plantas de gas natural pueden emitir no más de 1,000 libras de CO₂ por MWh. Una preocupación ambiental importante asociada al gas natural es la fuga de metano (un potente GEI) durante su extracción y transporte, lo que puede mitigar parte de sus beneficios ambientales en comparación con el carbón.

Una de las ventajas más destacadas de la energía nuclear es que las centrales nucleares no queman combustibles fósiles y, por lo tanto, no emiten directamente dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂), partículas o mercurio durante su operación. Esto las convierte en una fuente de electricidad con

muy bajas emisiones de gases de efecto invernadero a lo largo de su ciclo de vida, comparable con las energías renovables en este aspecto (Madariaga Martínez, 2024).

La comparación entre el potencial energético y los costos de generación eléctrica a partir de hidrocarburos y energía nuclear revela un panorama complejo y multifacético, donde cada fuente presenta un conjunto único de ventajas y desafíos.

En cuanto a la seguridad y fiabilidad, la energía nuclear presenta los factores de capacidad más altos (más del 90%), lo que garantiza un suministro de energía constante y fiable. A pesar de los accidentes históricos de Chernóbil y Fukushima, la industria nuclear ha demostrado ser segura, con un riesgo de accidentes bajo y en declive, respaldado por marcos regulatorios rigurosos y una cultura de seguridad en constante mejora. La percepción pública de la seguridad nuclear ha mejorado, y el apoyo a esta energía es alto. Las plantas de gas natural de ciclo combinado también ofrecen buena fiabilidad, pero las de ciclo simple se utilizan más para picos de demanda. Las plantas de carbón y petróleo tienen factores de capacidad más bajos y una fiabilidad decreciente con el envejecimiento. Los riesgos de seguridad en el sector de hidrocarburos están más relacionados con la contaminación atmosférica, los accidentes en la extracción y el transporte (fugaz de metano, explosiones en refinerías, incidentes en gasoductos) y los impactos en la salud pública (Gonzalez, 2024)

La persistencia de los combustibles fósiles en la matriz energética, a pesar del crecimiento de las energías renovables y nucleares, subraya la necesidad de un enfoque pragmático y diversificado. La energía nuclear, con su capacidad de carga base, baja emisión de carbono y alta fiabilidad, puede desempeñar un papel crucial en la descarbonización del sector eléctrico, complementando la intermitencia de las

energías renovables. “Los hidrocarburos, especialmente el gas natural con tecnologías de mitigación de emisiones como la CCS y la mezcla de hidrógeno, podrían servir como un puente o respaldo flexible en esta transición, dada su infraestructura existente y su capacidad de respuesta a la demanda” (Gonzalez, 2024).

6.6. Indicadores económicos fundamentales de la energía nuclear

La International Atomic Energy Agency (IAEA), y la World Nuclear Association (WNA) según la información proporcionada de sus informes, dicen que los valores exactos dependen de supuestos (tasa de descuento, costo de capital, vida útil, factores de capacidad), pero nos indican valores aproximados.

VPN (valor presente neto): mide si el proyecto agrega valor, si $VPN > 0$ el proyecto es económicamente aceptable. TIR (Tasa interna de retorno-IRR): tasa de descuento que hace que VPN sea igual a 0; si $TIR > \text{costo de capital del proyecto}$, este proyecto es viable. B/C (Razón beneficio/costo): razón entre los beneficios y los costos presentes; si $B/C > 1$ el proyecto será favorable.

6.7. Valores de referencia para proyectos nucleares

En un estudio para reactores modulares pequeños (SMR) y reactores grandes. Teniendo un precio de venta de electricidad de US\$100/MWh se obtuvo que:

$TIR \approx 8.90\%$ para reactores grandes con tasa de descuento del 3%

$TIR \approx 9.02\%$ para reactores modulares pequeños (SMR) con una tasa de descuento del 3%

Razón $B/C \approx 2.70$ para los reactores grandes con una tasa de descuento del 3%

Razón B/C $\approx$ 2.90 para los reactores modulares pequeños con una tasa de descuento de 3%

VPN en este caso fue $\approx$ US\$10.813 millones para un reactor grande con una tasa de descuento del 3%

Tabla 4.

Resumen de aspectos comparativos de las dos energías

ASPECTO	ENERGÍA NUCLEAR	ENERGÍA DE LOS HIDROCARBUROS
Fuente principal	Fisión del uranio o plutonio	combustión de gas natural, petróleo
Combustible	Uranio-235, Plutonio-239	Petróleo, Gas natural
Densidad energética	Muy alta (pequeñas cantidades de combustible producen grandes cantidades de energía)	Media (requiere grandes volúmenes de combustible para igualar la producción nuclear)
Tecnologías clave	Reactores nucleares (PWR, BWR, SMR, IV generación)	Plantas termoeléctricas, motores de combustión
Emisiones de carbono (CO ₂ eq/kWh)	Muy bajas (7-14 gCO ₂ eq/kWh)	Altas (390-760 gCO ₂ eq/kWh)
Residuos	Radiactivos, de baja a alta actividad; requieren gestión a largo plazo	CO ₂ , NO _x , SO _x , lodos aceitosos, catalizadores agotados
Riesgos y seguridad	Riesgo de accidentes nucleares y radiación; alta seguridad tecnológica	Riesgos de fugas, incendios, explosiones, derrames, contaminación crónica y etc....
Costos de inversión (CAPEX)	Alto (infraestructura y tecnología especializada) entre 5-8 mill de US	Moderado; depende del tipo de planta, pero puede variar entre 900 mil y 1.2 millones de dólares por MW instalado
Costos operativos (OPEX)	Bajo (una vez construida, la operación es económica)	Variable y dependiente del mercado energético global

Disponibilidad	Energía base constante (alta confiabilidad)	Flexible, permite ajustes rápidos a la demanda
Impacto ambiental	Mínimas emisiones; desafío en residuos radiactivos y uso intensivo de agua	Alta huella de carbono, contaminación de aire, agua y suelos
Gestión de residuos	Compleja; requiere almacenamiento geológico por miles de años	Voluminosos y tóxicos, pero de manejo más conocido y extendido
Seguridad Energética	Alta (bajo consumo de combustible y gran autonomía)	Dependencia de reservas limitadas y fluctuaciones geopolíticas
Nuevas tecnologías	Reactores modulares pequeños (SMR) y reactores de IV generación	Captura de carbono, gas como combustible de transición

Nota: la tabla fue elaborada propiamente, pero los datos se sacaron de diferentes entidades y organismos como la agencia internacional de energía (AIE), el panel intergubernamental sobre cambio climático (IPCC), la agencia nuclear de energía (NEA), la unidad de planeación minero-energética (UPME), la agencia nacional de hidrocarburos (ANH), entre otras.

Esta tabla es una herramienta analítica central que materializa el ejercicio de comparación que hemos venido desarrollando en la investigación, facilitando la comprensión de las diferencias fundamentales entre ambas fuentes de energía. Y aportándonos conclusiones de las dos energías, se evidencia una importancia en el análisis energético por parte de la energía nuclear evidenciando su alta densidad energética y bajas emisiones de CO₂, pero también sus desafíos en términos de altos costos de inversión inicial y gestión de residuos a largo plazo.

Para los hidrocarburos muestra su flexibilidad y respuesta rápida, pero se remarca su alto impacto ambiental de CO₂. Para Colombia la tabla cobra especial importancia porque permite fundamentar que, debido a la disminución de reservas de hidrocarburos en el país y la necesidad de cumplir compromisos climáticos, la energía nuclear y los hidrocarburos pueden coexistir y así representar un camino más realista para la transición energética en Colombia.

Conclusiones

El análisis técnico permitió evidenciar que la energía nuclear presenta una alta densidad energética, una baja emisión de gases de efecto invernadero y una mayor eficiencia en la generación eléctrica respecto a los hidrocarburos. Sin embargo, su implementación depende de una infraestructura tecnológica avanzada y de estrictos controles de seguridad radiológica. En contraste, los hidrocarburos mantienen su liderazgo por su madurez tecnológica, flexibilidad operativa y disponibilidad inmediata, aunque con un alto impacto ambiental y una tendencia decreciente en sus reservas. Esta comparación confirma que la energía nuclear es una alternativa viable y complementaria dentro de una matriz energética diversificada.

Las variables de reserva, producción y demanda mostraron un comportamiento desigual entre ambas fuentes. Mientras los hidrocarburos presentan reservas limitadas y una demanda aún creciente, la energía nuclear mantiene una oferta estable de uranio y una producción con potencial de expansión, especialmente con el desarrollo de reactores modulares pequeños (SMR). La investigación concluye que la sostenibilidad del sistema energético global dependerá de equilibrar estas variables mediante una transición gradual, en la que los hidrocarburos actúen como soporte temporal y la energía nuclear asuma un papel estratégico a largo plazo.

El análisis ambiental evidenció que la energía nuclear, pese a los riesgos asociados a los residuos radiactivos y a la seguridad operativa, tiene un impacto ambiental significativamente menor en términos de emisiones de CO₂, contaminación atmosférica y cambio climático. En cambio, los hidrocarburos generan una alta huella de carbono, contribuyendo directamente al calentamiento global y la degradación de ecosistemas. Por tanto, desde un enfoque ambiental, la energía nuclear representa una alternativa sostenible para

la descarbonización progresiva del sistema energético mundial. La investigación demostró que los costos de inversión inicial (CAPEX) de las centrales nucleares son elevados debido a la infraestructura y la tecnología especializada, mientras que los costos operativos (OPEX) resultan bajos una vez puesta en marcha la planta. En contraste, las plantas basadas en hidrocarburos tienen una inversión inicial menor, pero presentan costos operativos y de mantenimiento altos, sujetos a la volatilidad del mercado energético. En términos de eficiencia económica y sostenibilidad, la energía nuclear ofrece mayor estabilidad a largo plazo, especialmente cuando se integran tecnologías de nueva generación como los reactores SMR, que optimizan el rendimiento y reducen los riesgos financieros.

Recomendaciones

Se recomienda profundizar en estudios de viabilidad económica de la energía nuclear en el contexto colombiano, evaluando escenarios de costos de instalación, operación y desmantelamiento. Igualmente, es necesario ampliar investigaciones en torno a tecnologías emergentes como los reactores modulares pequeños (SMR).

Incentivar la investigación universitaria y técnica sobre combustibles más seguros y eficientes, como los Accident Tolerant Fuels (ATF) y el TRISO, que reducen el riesgo de accidentes y mejoran la eficiencia del ciclo del combustible.

El sector privado puede integrar la energía nuclear con la producción de hidrógeno verde o azul, aprovechando el calor de los reactores para procesos de electrólisis, contribuyendo a la descarbonización del sector industrial y de transporte.

Las universidades, en particular la UIS, deben promover centros de investigación enfocados en tecnologías de reciclaje del combustible usado y almacenamiento geológico seguro, buscando disminuir el impacto ambiental y aprovechar el material residual.

Referencias Bibliográficas

- Aguilar Hortua, L. G. (2024). *Criterios técnicos de evaluación de fuentes no convencionales de energía en un distrito técnico en Colombia*. Bogotá: Fundación Universidad de América.
<https://repository.uamerica.edu.co/server/api/core/bitstreams/393074cb-6174-45df-9ca9-48e71d5ea3a7/content>
- Ariza, E. (2024). *Cadena productiva de los hidrocarburos*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
<https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=lq8PEQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT19&dq=El+ciclo+de+vida+de+los+hidrocarburos+abarca+desde+su+formaci%C3%B3n+geol%C3%B3gica+hasta+su+utilizaci%C3%B3n+como+combustibles+o+materias+primas,+incluyendo+la+exploraci%C3%B3n>
- Bazan Perkins, S. (2005). La energía nuclear, una alternativa de sustentabilidad para resolver la demanda eléctrica en México. *ingeniería de investigación y tecnología vol 6*, 18. Obtenido de <https://www.scielo.org.mx/pdf/iit/v6n4/1405-7743-iit-6-04-281.pdf>
- BID. (2008). *Desarrollo sostenible: medio ambiente, cambio climático y energía*. Bruselas: New York Ave. <https://keneamazon.net/Documents/Publications/Virtual-Library/Equidad-Desarrollo-Social/20.pdf>
- Calvo, R. (2010). Una historia de Navidad. El descubrimiento de la fisión nuclear. *Uruguay educa un portal en movimiento*, 2-3. <https://uruguayeduca.anep.edu.uy/sites/default/files/2017-12/Una%20historia%20de%20navidad.pdf>
- Cesarz, K. (2023). *Análisis económico y medioambiental de la energía nuclear*. Valladolid: Universidad de Valladolid. <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/61185/TFG-I-2648.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Cesarz, K. (2023). *Análisis económico y medioambiental de la energía nuclear*. Valladolid: Universidad de Valladolid. <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/61185/TFG-I-2648.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Duarte-Bernal, J. L. (2022). *Bombas y energía nuclear, física del miedo y la salvación*. Bogotá: Universidad pedagógica nacional. <https://revistas.upn.edu.co/index.php/PI/article/view/20159/13055>
- Durán, Apio, L. D., & Jiménez. (2022). Pequeños reactores modulares: el futuro de la energía nuclear. (201). <https://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/2468>
- EI. (25 de mayo de 2025). *Energy Institute*. Obtenido de Energy institute: <https://www.energyinst.org/statistical-review>
- EI. (25 de mayo de 2025). *Energy institute*. Energy institute: <https://www.energyinst.org/statistical-review>
- Energy institute. (2024). *Statistical Review of World Energy*. Energy institute. KEARNY. https://www.bpb.de/system/files/dokument_pdf/Statistical_Review_of_World_Energy_2024.pdf
- Figueroa, H. (2022). *Diseño de una hoja de cálculo para estimar los costos de tecnologías de captura de CO2 en centrales termoeléctricas*. Cuernavaca: Universidad Autónoma del estado de Morelos. <http://www.riaa.uaem.mx/xmlui/bitstream/handle/20.500.12055/2871/FIGHRC10.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Fresco, P. M. (2024). *El nuevo orden verde*. Bogotá: Biblioteca Nacional de Colombia. <https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=JdwBEQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA3>

2&dq=Desde+hace+varias+d%C3%A9cadas,+el+mundo+ha+estado+consciente+de+que
+debe+dejar+atr%C3%A1s+los+combustibles+f%C3%B3siles+y+transitar+hacia+las+e
nerg%C3%ADas+renovables,+pero+los

Galeano, D. A. (2023). La Energía Nuclear en el Sector Eléctrico Colombiano: Una Alternativa Técnica y Sostenible. *Rev. ion*, 36(3), 7-14. doi:<https://doi.org/10.18273/revion.v36n3-2023001>.

Galfrascoli, G. M. (2024). *Estudio Experimental y Teórico de la Dispersión Elástica del Sistema ^7Li + ^{197}Au* . Rosario: Universidad Nacional de Rosario. <https://usuarios.fceia.unr.edu.ar/~idbetan/TesinasDeGrado/2024GabrielGalfrascoli.pdf>

García López, J. (2013). *diseño y construcción de un sistema de control automático para una caldera piro tubular horizontal*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. <https://dspace.esPOCH.edu.ec:8080/server/api/core/bitstreams/487b8ee0-8c95-4354-9577-185036ac8a5b/content>

García, C. (2023). *Impactos sociales del cambio climático*. Madrid: Los libros de la catarata. <https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=VCXeEAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1976&dq=La+creciente+demand+a+energ%C3%A9tica+a+nivel+mundial+se+enfrenta+a+un+desaf%C3%ADo+sin+precedentes:+la+necesidad+imperiosa+de+mitigar+el+cambi+o+clim%C3%A1tico,+un+fen%C3%B3men>

García, L. (2023). *Análisis socioeconómico de la energía nuclear como fuente para la transición energética*. Valladolid: Universidad de Valladolid, Facultad de Comercio. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/63451>

García, I., & Moreno, C. (2018). *Elementos radioactivos de la tabla periódica: descubrimiento y nucleosíntesis artificial*. Madrid: Universidad Complutense.

<https://docta.ucm.es/rest/api/core/bitstreams/bba90777-3d15-411d-b02d-fc36581c021d/content>

Garcia-Ruiz, A. (2004). *Evaluacion del sistema de agua de circulacion de una central nuclear mediante tecnicas de microbiologia molecular*. madrid: Escuela tecnica superior de ingenieros industriales. <https://oa.upm.es/226/1/05200436.pdf>

Gonzalez, G. F. (2024). EL PAPEL CRUCIAL DE LA ENERGÍA NUCLEAR EN EL DESARROLLO SOSTENIBLE. *Universidad Claeh*, 5-10. <https://mail.ojs.claeh.edu.uy/publicaciones/index.php/rderecho/article/view/724/539>

Harper, E. (2009). *Tecnologias de generacion de energia electrica*. Ciudad de Mexico: Camion Escolar, 2009. <https://books.google.com.co/books?id=BUINAgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>

Hermoso F, J. (2025). *Fusión y fisión nuclear: perspectivas energéticas y tecnológicas*. Trabajo de fin de grado, Valencia. https://titula.universidadeuropea.com/bitstream/handle/20.500.12880/12099/TFG_JAVIER_HERMOSO.pdf?sequence=1&isAllowed=y

IDEAM. (2021). Inventario nacional de emisiones y absorciones atmosféricas de Colombia. https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2025/05/Inventario_Nacional_de_Emisiones_y_Absorciones_Atmosfericas_de_Colombia.pdf

IEA. (12 de junio de 2024). *Agencia internacional de Energia*. International energy Agency.

- Juarez Luna, D. (2020). Beneficios económicos y ambientales de la energía nuclear. *Universidad Anahuac Mexico*, 10-16. https://mpra.ub.uni-muenchen.de/98790/1/MPRA_paper_98790.pdf
- Khaleel, Basim, Khalil, & Hasmady. (2022). Energy and exergy analysis of the steam power plants: A comprehensive review on the classification, development, improvements, and configurations. *Engineering Journal*, 13. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447921004160>
- Laciar, A. (1958). *La energía nuclear al servicio de la economía de los estados*. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires: Biblioteca Alfredo L. Palacios. http://bibliotecadigital.econ.uba.ar/download/tesis/1501-0700_LaciarAA.pdf
- Larrazabal, & Ruiz. (2005). *Optimizacion del sistema de tratamiento de agua para la generación de vapor de la planta E-4 unidad de explotación tierras este pesado distrrito tía juana*. Maracaibo: Universidad Rafael Urdaneta. <https://documentos.uru.edu/pdf/2101-05-00601.pdf>
- Madariaga Martinez, P. (2024). *Desarrollos tecnologicos para la generacion de energia nuclear de forma sostenible*. Bilbao: Universidad del Pais Vasco. <https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/72689/TFG%20MadariagaPablo.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Mendoza, G., & Lopes, X. (2019). *Reactores modulares pequeños una opción para México*. Monterrey: Congreso anual de la sociedad nuclear Mexicana. https://ingenierias.uanl.mx/anteriores/85/documentos/A22_N85_suplemento_en_linea_v2.pdf#page=241

Minenergía. (2022). *Informe de registro de proyectos de generacion*. Santa Marta: Unidad de

Planeacion Minero Energética UPME.

https://www1.upme.gov.co/siel/Inscripcion_proyectos_generacion/Registro_marzo_2022.pdf

Minenergía. (2023). Central Termoguajira será la primera en transitar hacia generación eléctrica 100% descarbonizada. Riohacha, La Guajira, Colombia.

Navarro Sarmiento, M. X. (2023). *Sostenibilidad del sector de hidrocarburos en Colombia: Perspectiva y alternativas al petróleo de cara al 2050*. Medellin: Universidad Pontificia Bolivariana.

<https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/10603/Sostenibilidad%20de%20sector%20de%20hidrocarburos%20en%20Colombia.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Nuclear Energy Agency. (2024). *Uranium 2024: Resource, production and demand*. OECD.

Ochoa, García, & Aragonés. (2010). *Análisis de la transmutación de actínidos minoritarios en un reactor rápido de sodio con modelo de carga homogéneo mediante el códigoMCNPX-CINDER*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

<https://www.sendaeventos.com/qrms/467380/docs/467380-712103.pdf>

Puemape, L. (2007). *Calderas y turbinas de vapor para la generación de energía eléctrica*. Lima:

Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

https://www.academia.edu/110576655/Calderas_y_Turbinas_de_Vapor_para_la_Generaci%C3%B3n_de_Energ%C3%ADa_El%C3%A9ctrica

Rodriguez, D. (2025). *Analisis del ciclo de vida nuclear intengrando las tecnicas de separacion y transmitacion*. Madrid: Universidad politecnica de madrid.

https://oa.upm.es/88942/1/TFM_DANIEL_OLIVA_RODRIGUEZ.pdf

Rojas, R. (2020). *Propuesta de sistema de filtrado para agua de mar, planta de desalinización.*

Valparaíso: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-0000/UCB0331_01.pdf

Romero, M. (2025). *Transición energética: ¿Evolución o revolución hacia el Net zero?* Buenos

Aires: Universidad de San Andrés.

<https://dspaceapi.live.udesar.edu.ar/server/api/core/bitstreams/26c22761-6d44-4a18-8072-70648f2facb3/content>

Santander Marín, J. (2025). *Propuesta De Un Modelo Conceptual De Desarrollo De Energía*

Nuclear Para La Ampliación De La Canasta Energética En Colombia. Bucaramanga:

Universidad Autónoma de Bucaramanga.

<https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/28482/Tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Semenova Mirkhusanov, D. U. (2024). Pronóstico del costo y volumen de la minería de uranio

para diferentes escenarios de desarrollo de la energía nuclear mundial. *Nuclear energy and technology*, 131-137. <https://nucet.pensoft.net/article/130485/>

Servian, J. (2021). Una historia de navidad. El descubrimiento de la fisión nuclear. (1), 75-78.

Obtenido de https://ojs.cfe.edu.uy/index.php/rev_quimica/article/view/939/613

Tartera, G., & Gonçalves. (2018). *Los residuos radioactivos.* Madrid: Revista de Innovación

Didáctica de Madrid.

[https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/56648404/20180501_MADRID.N51-](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/56648404/20180501_MADRID.N51-libre.pdf?1527197784=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DSECUENCIA_DE_UN_SISTEMA_TRIFASICO_)

[libre.pdf?1527197784=&response-content-](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/56648404/20180501_MADRID.N51-libre.pdf?1527197784=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DSECUENCIA_DE_UN_SISTEMA_TRIFASICO_)

[disposition=inline%3B+filename%3DSECUENCIA_DE_UN_SISTEMA_TRIFASICO_](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/56648404/20180501_MADRID.N51-libre.pdf?1527197784=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DSECUENCIA_DE_UN_SISTEMA_TRIFASICO_)

MEDICI.pdf&Expires=1758498402&Signature=bLSzBTIg9B60HppW2hicDjBZOOh1zF
Rs~n5wDwf243a

Tobon, Z. (2020). Consulta sobre la construcción y realización de todo tipo de actividades, relacionadas con la construcción de plantas de generación de energía eléctrica. *Minenergia*, 2-4. <https://minenergia.gov.co/documents/10675/2-2020-007094.pdf>

Torres, L. (Enero de 2025). Colombia y la energía nuclear entre retos y expectativas. *Laura torres*, 8. <https://ipsnoticias.net/2025/01/colombia-y-la-energia-nuclear-entre-retos-y-expectativas/>

Treviño Jara, A. (2025). *Análisis del plan nacional integrado de energía y clima y propuesta de un mix energético alternativo*. Elche: Universidad Miguel Hernández de Elche. <https://dspace.umh.es/bitstream/11000/36515/1/TFG-Trevi%20Jara%20Alejandro.pdf>

Ugartemendia, X. (2024). *Energía nuclear y transición energética: el caso de la Taxonomía de Inversión Verde de la Unión Europea*. Buenos Aires: Universidad nacional de San Martín. https://ri.unsam.edu.ar/bitstream/123456789/2942/1/TLIC_EPYG_2024_UX.pdf

Velasquez, J. (2017). Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. *Johana Andrea Velasquez* Arias, 18. <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/1846/2227>

Vidal, J. B. (1962). *Reactores nucleares*. Murcia: Universidad de Murcia. <https://revistas.um.es/analesumciencias/article/download/101821/98131>

Zhang, C. (2024). *Aspectos económicos de la transición a un sistema energético bajo en emisiones*. Mostoles: Universidad rey juan carlos.

<https://burjcdigital.urjc.es/server/api/core/bitstreams/572a3286-d879-4148-8f55-f20ac2ed87e7/content>