

DATOS GENERALES	
<b>Nombre del estudiante</b>	: Mayor de I.M Heber Alonso Cardona Perez
<b>Identificación</b>	: 92540380
<b>Programa académico</b>	: Maestría en Estrategia y Geopolítica
<b>Tutor metodológico</b>	: CN (R)
<b>Tutor temático</b>	: Capitán de Navío (R) Luis Hernando Osorio Dussan
<b>Fecha de entrega</b>	: 4 de septiembre de 2023
<b>Extensión</b>	: 9.686 palabras

#### DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD Y CESIÓN DE DERECHOS

El autor declara que este capítulo de libro fue escrito de acuerdo con la normatividad de la Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto” (ESDEG) y no existe ningún potencial conflicto de interés relacionado con este. Las posturas y aseveraciones presentadas son resultado de un ejercicio académico e investigativo que no representan la posición oficial ni institucional de la ESDEG, las Fuerzas Militares de Colombia o el Ministerio de Defensa Nacional.

Este capítulo es enteramente mi propio trabajo y no ha sido presentado para la obtención de un título en esta u otra Institución de Educación Superior. Se han referenciado todos los trabajos y puntos de vista de otros autores, así como los datos de otras fuentes utilizadas. No se emplearon herramientas de generación de contenido por Inteligencia Artificial para su elaboración.

El autor acepta ceder los derechos de publicación en favor de la ESDEG y su Sello Editorial de acuerdo con los términos de la licencia Creative Commons: [Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas](#).

#### AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

El autor **autoriza** que este capítulo sea publicado por el Sello Editorial ESDEG en su repositorio institucional y esté disponible bajo una modalidad de [acceso abierto](#).

# **Viabilidad de un Programa Nuclear en Colombia.**

## **Feasibility of a Nuclear Program in Colombia.**

**Heber Alonso Cardona Perez<sup>1</sup>**

Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”

Resumen: La energía Nuclear se abre paso como opción de generación eléctrica para combatir los efectos del cambio climático, sin embargo, su aplicación en el país requiere revisar cual es el estado actual de los avances tecnológicos, cual es el panorama regulatorio que facilite al país generar la suficiente confianza para permitir su acceso, que inconvenientes habría para acceder al combustible nuclear y su ciclo, y finalmente, si existe un mercado internacional de energía eléctrica a nivel regional, que pueda solventar con el tiempo los costos iniciales de inversión que demanda el usos de este tipo de energía, la decisión final nos permitirá establecer que el transcurso de su incorporación a la canasta de generación, no se comprometa la soberanía nacional producto de una dependencia comercial para garantizar su uso.

Palabras clave: Regulación Nuclear; Productores de Uranio; Demanda de Energía; Reactores de Ultima Generación.

Abstract: Nuclear energy is making its way as an option for electricity generation to combat the effects of climate change, however, its application in the country requires reviewing the current state of technological advances, what is the regulatory landscape that facilitates the country generate enough confidence to allow its access, what inconveniences would it open to access nuclear fuel and its cycle, and finally, if there is an international market for electrical energy at the regional level, that can cover over time the initial investment costs demanded by the uses of this type of energy, the final decision will allow us to establish that during its incorporation into the generation basket, national sovereignty is not compromised as a result of a commercial dependency to guarantee its use.

Keywords: Nuclear Regulation; Uranium Producers; Energy Demand; Last Generation Reactors.

---

<sup>1</sup> Mayor de Infantería de Marina Armada de Colombia. Candidato a magíster en estrategia y geopolítica, Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”, Colombia. Profesional en Ingeniería Mecánica, Universidad Autónoma del Caribe, Especialista en Política y Estrategia Marítima, Escuela Naval de cadetes “Almirante Padilla, Colombia. <https://orcid.org/0000-0003-2004-7466> - Contacto: heber.cardona@armada.mil.co.

## **Introducción**

Como consecuencia de la crisis climática, las naciones del mundo se reunieron en París durante el año 2015, a fin de tomar decisiones sobre el cambio que viene dándose y los problemas que este representa para la continuidad de la vida del hombre y de los seres en general sobre la tierra. Como parte de la solución, el uso de energías renovables le ofrecería a la humanidad un suministro de energía con baja emisión de gases de efecto invernadero. Sin embargo, este tipo de energías aun presentan puntos débiles como el almacenaje, importante ya que el viento o el sol como fuente de energía, son elementos que fluyen con intermitencia.

En este escenario, la producción de energía eléctrica a partir de energía nuclear tiene un impacto significativo sobre los objetivos de desarrollo sostenible, y por su confiabilidad frente a otros tipos de generación, le asegura un puesto en el largo plazo dentro del sector industrial. La energía nuclear por la versatilidad lograda gracias a los avances alcanzados hasta ahora, se pone de presente en el futuro de aquellos Estados que proyectan un crecimiento demográfico y económico en el mediano plazo (Chudakov, 2016).

La energía nuclear, puede ser utilizada de forma pacífica en procesos para la producción de energía eléctrica, con bajas emisiones de CO<sub>2</sub> a diferencia de los que se llevan a cabo con carbón o gas natural. Este estudio busca determinar la viabilidad de su incorporación como una opción más de generación eléctrica en Colombia, teniendo en cuenta que un cúmulo de experiencias recopiladas por los países que la han usado por años, hoy días la convierten en una opción a considerar en la lucha por evitar el cambio climático, y es que a pesar de los temores como consecuencia de accidentes y usos bélicos por parte de algunos países, son estos antecedentes los que han impulsado su evolución tecnológica al igual que la rigurosidad con que se controla en el escenario internacional.

La poca iniciativa colombiana respecto al uso de esta tecnología podría obedecer a la falta de información sobre sus avances tecnológicos, las mejoras en sistemas de seguridad, la optimización de sus procesos, y flexibilidad de usos. Pero también es cierto, que conocer más de esta tecnología y sus procesos, dará cuenta, de si lo que realmente sucede es que, en las condiciones actuales, puede o no representar riesgos desde las perspectivas de soberanía nacional y económica comercial, a lo que se suma, la

generalizada preocupación por el manejo final de los desechos nucleares y sus consecuencias en la preservación del medio ambiente.

Por lo anterior este apartado busca resolver la interrogante para determinar ¿cuál es la viabilidad de implementar un programa de energía nuclear en Colombia? Actualmente existe información suficiente y disponible para conocer su funcionamiento, el impacto medioambiental y de cómo desarrollar su implementación. Hay una importante evolución tecnológica que brinda versatilidad en sus usos, rigurosas medidas de seguridad y mejoras en la gestión de los desechos nucleares. Colombia ha construido garantías, confianza y mecanismos suficientes frente a los organismos internacionales de control, y la superación de las eventuales complejidades que puedan surgir para el acceso a la tecnología y el combustible nuclear que requiere su funcionamiento, por último, el uso de esta tecnología pronostica beneficios comerciales y ventajas militares dentro de una estrategia naval de defensa en Colombia.

En el primer capítulo, se describe el estado actual de esta tecnología, que tan libre de producir gases efecto invernadero es con respecto a las otras fuentes de energía disponibles, aborda una descripción de la información para iniciar un programa y garantizar su uso de forma segura. El segundo capítulo busca evidenciar la ruta de acceso a esta tecnología en Colombia, como se ha venido regulando su uso en el ámbito internacional, y que posibles implicaciones representa acogerse a estos parámetros con el fin de generar la suficiente confianza internacional, que garantice al país un acceso tecnológico ininterrumpido para su correcto desarrollo.

El tercer capítulo está dedicado al punto más neurálgico en el desarrollo de tecnología nuclear, la situación para el acceso al Uranio. Aquí se describe la producción mundial, la cobertura actual y quiénes son sus principales productores. Seguido veremos algunos estudios realizados sobre el potencial de Uranio en yacimientos colombianos. También señalaremos la importancia del procesamiento del Uranio que busca darle mejores propiedades químicas para su uso en plantas nucleares, muy dependiente de las capacidades tecnológicas presentes en cada país. El capítulo además describe un hecho coyuntural en el escenario internacional del cual derivan algunas preocupaciones alrededor del acceso al Uranio y su procesamiento, esto como un caso de consideración para evidenciar las

amaneczas a la soberanía de los Estados como consecuencia de una dependencia energética.

En el cuarto capítulo identificamos las oportunidades que brinda la energía nuclear en el escenario comercial, describiendo las necesidades regionales de energía eléctrica tanto en el país como en dos de sus vecinos fronterizos, al final, veremos también que su empleo estratégico para la defensa, basados en la disponibilidad de las nuevas generaciones de reactores para la producción de energía nuclear, son viables para ser usados a bordo de las Unidades Navales, no como armas o medio disuasivo, si no como mejoras en el desempeño táctico para la defensa de la república de Colombia.

## **Metodología**

Por la naturaleza del objeto a investigar, es decir, la determinación de la viabilidad concebida finalmente como la decisión política frente a una cuestión, emplearemos un enfoque cualitativo para aproximarnos a las características y circunstancias de cada factor alrededor del problema. Se debe considerar a la Energía Nuclear en este punto de la modernidad, como un fenómeno que es conocido, en tal sentido, daremos un alcance descriptivo a las respuestas que tiene comunidad internacional, frente a las particulares intenciones de países en interactuar con la energía nuclear. El sentido a la investigación se dará a través del análisis de contenidos con corte transversal. Las variables para observar serán: el acceso al uranio enriquecido, estado actual de la tecnología nuclear, aspectos regulatorios y mercado internacional de energía eléctrica exportable. La población analizada proviene de fuentes mayormente de secundarias, aunque también se consideraron importantes hallazgos en fuentes primarias. Hará parte de esa población aquellos documentos, artículos, noticias, informes y regulaciones, de agencias especializadas, instituciones de estado, y organismos internacionales entre otros, que pueda contener información relevante sobre las variables de estudio. Se desarrollará un muestreo no probabilístico dirigido hasta considerar, que se tiene suficiente información analizada para permitir una descripción suficiente mente estructurada de cada una de las variables consideradas. La recolección de información se hará a través de la consulta de los documentos o información que puedan hallarse disponibles en los sitios web de la red o sistemas de bibliotecas, seleccionados mediante valoración preliminar introductoria del

contenido, de la coherencia, relevancia, pertinencia y confiabilidad, se efectuara recurrencia a la contrastación de información entre diferentes fuentes, y seguido a esto, se clasificación de la información por variable de estudio, para posteriormente realizar análisis e interpretación de la información.

### **Estado Actual de la Tecnología Nuclear con Usos Pacíficos.**

La reputación que le precede el uso de la energía nuclear, generada por accidentes ocurridos como los de Chelliabnsk-40 de 1957 y Chernobyl de 1986 en la antigua Unión Soviética (Veiga, 2016), o los acontecidos en EE.UU como el de Three Mile Island en 1979 y Windscale de 1957 en Inglaterra 1957 (Robert Whitcomb, 2000), han estigmatizado su empleo en la actualidad, sin embargo, esto correspondería a un sentido de aversión motivado entre varios aspectos, por falta de conocimiento.

Hoy día se abren nuevas oportunidades para la energía nuclear gracias a la competitividad de esta en relación con otras fuentes para la generación de energía eléctrica como la hidráulica y la térmica, y en el contexto actual, lo amigable con respecto al medio ambiente. Estudios realizados han determinado que “la energía nuclear con fines pacíficos resulta una opción confiable y factible desde el punto de vista económico y ambiental” (Francisco Alvares, 2012), toda vez que los avances tecnológicos que en la actualidad se han alcanzado en su cuarta generación, así lo confirman.

### **La Regulación en el Uso de Energía Nuclear.**

La Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA) que se tratara en el segundo capítulo, es el organismo internacional que reúne las herramientas regulatorias y técnicas en materia de energía nuclear, y en su portal web, se dispone de una amplia información para la adecuada construcción de las condiciones de seguridad para el desarrollo de un programa de energética nuclear con fines pacíficos.

Las experiencias vividas por países desde los años 50’s durante el recorrido para alcanzar el dominio de la energía nuclear, ha sido compilada en guías y manuales publicados por la OIEA, y sirve a los Estados para formular políticas, crear marcos

jurídicos, construir condiciones de seguridad física, tratar los desechos, ejercer adecuado control en el ciclo del combustible, y la apropiada gestión del talento humano. Incluso el terrorismo como nueva amenaza de los Estados, el temor alrededor del mal uso que este puede dar a la energía nuclear, motivó la creación de acciones concernientes a los materiales radiactivos conocidas como salvaguardas, y que deben convenir los Estados socios en la implementación de sus programas nucleares. Por último, haciendo parte de la OIEA, se dispone del listado de países socios, con los cuales Colombia puede construir acuerdos de cooperación en materia de transferencias de tecnología y conocimientos (OIEA, 2023).

### **Como Funciona una Planta de Energía Nuclear para Producir Electricidad.**

Sobre la producción de energía eléctrica a partir de energía nuclear, es un proceso que se desarrolla con bajas emisiones de CO<sub>2</sub>. En teoría básica, el proceso consiste en elevar la temperatura del agua contenida en un recipiente a partir del calor generado al interior de un reactor, por la fisión de barras de uranio al ser bombardeadas por neutrones. El vapor producido en este primer recipiente se hace circular por un sistema de tuberías que transfiere calor posteriormente a otro recipiente con agua, aquí también se genera vapor el cual, a través de otro sistema de tuberías, se hace circular por las hélices de una turbina que se encuentra acoplada a un generador eléctrico, de esta forma, se transforma el movimiento mecánico rotacional en electricidad (Jawerth, 2020).

Sim embargo, al analizar lo anterior como todo un ciclo, se debe considerar que actualmente construir una central nuclear, extraer el combustible (Uranio) de las minas y el proceso de enriquecimiento, e incluso el posterior desmantelamiento de esta central al final de su vida útil, podría estar produciendo ciertas afectaciones al medio ambiente (Cano, 2019).

### **El Impacto al Medio Ambiente**

Parte del ciclo lo compone la extracción de Uranio, para el año 2017, el 50% se realizaba a cielo abierto, la relación de producción de toneladas de CO<sub>2</sub> se dan en promedio 40 a 1 con respecto a la producción Uranio. En la limpieza se emplean en promedio 1 millón de litros

de agua por cada tonelada de Oxido de Uranio extraído. Hay dos métodos para enriquecer el uranio: la difusión gaseosa usada por los EE. UU, y la centrifugación que es la técnica que emplea Europa y Rusia. Solo el 15% del uranio extraído y tratado (enriquecido) servirá como combustible nuclear para los reactores, el otro 85% es solo residuo. Para garantizar que un reactor de 1GW (Giga Watts o Gigavatio) trabaje durante un año, se necesitan aproximadamente 27 toneladas de Uranio enriquecido fresco cada año. Al final del ciclo de vida de la central nuclear, hay que pensar en deshacerse de unas 170.000 toneladas de hormigón, 32.000 de acero, 1.363 de cobre y un total de 205.464 de otros materiales que en promedio lleva el construir una central típica de 1GW (Bohigas, 2017).

Aunque el panorama anterior no se vea muy alentador, lo cierto es que a lo largo de los años se ha logrado avanzar mucho en esta tecnología, por ejemplo, en relación con emisiones de CO<sub>2</sub> como producto de la generación de electricidad, una planta nuclear produce unos 65 g (Gramos) de CO<sub>2</sub> / kWh (Kilovatio/Hora), mientras que las plantas térmicas a base de combustibles fósiles como las de Diesel o Carbón producen de 600 a 1200 g de CO<sub>2</sub> / kWh y las de generación solar pueden llegar a expulsar unos 90 g de CO<sub>2</sub> / kWh. Por otro lado, las emisiones de Co<sub>2</sub> de las plantas de energía nuclear, son mayores en comparación de otras a base de energías renovables como la eólica e hidráulica, que están entre 30 y el 65 g de CO<sub>2</sub> / kWh (Gonzalo Jumenez Varas, 2011).

### **Tipos de Reactores Nucleares**

Los reactores nucleares varían en diseño y se clasifican de acuerdo con su configuración, objetivos o su etapa de generación. La clasificación más utilizada es aquella a partir del año de construcción y se denomina Generación. Los de I Generación, fueron construidos en 1957, los de II Generación, entraron en funcionamiento a mediados de la década de los 60's, aquellos de III Generación, muchos más avanzados, seguros y con una mayor capacidad de generación, se empezaron a construir a partir de los años 90's, los conocidos como reactores de III+ Generación, poseedores de salvaguardias estructurales y/o elementos de seguridad pasiva más sofisticadas, fueron diseñados a inicios del siglo XXI, finalmente, hoy día los reactores de IV Generación, son los más eficientes en el consumo del combustible, generando menos residuos radioactivos, y con sistemas de seguridad mucho más tecnológicos (Martinez, 2017).



Dentro de los reactores de IV generación, encontramos los SMR (Small Modular Reactor) que pueden generar unos 300 MW (Megavatios) (Fisher, 2017)), aunque también pueden ser diseñados para menores requerimientos como, por ejemplo, un sector específico de la industria (Liou, 2021). Para hacernos una idea, con 300 MW de generación, se podría brindar energía a una ciudad mediana de unos 500 mil habitantes. Al ser modulares no se fabrican en sitio, se construyen en masa y los módulos son de fácil transporte para ensamble en el lugar requerido. La naturaleza de su construcción reduce tiempos de puesta en operación y a precios más económicos. Las facilidades de acoplamiento a otros sistemas le permiten participar en el proceso de generación eléctrica, y a la vez, por ejemplo, de un sistema de desalinización, o producción de hidrógeno. Por ser más eficientes y seguros, permiten ser instalados cerca a los centros poblados reduciendo pérdidas de energía durante la transferencia (Luis Duran, 2022).

Más hitos evolutivos siguen apareciendo para el desarrollo de energía eléctrica a partir de energía nuclear a partir de las experiencias, como la que dejó el trágico acontecimiento en Fukushima, pues en términos de seguridad impulsan por ejemplo las propuestas para el diseño de plantas que puedan trabajar desde la seguridad del mar, esto, en consideración a la existencia de zonas con características específicas que limitan el acceso al agua potable y energía eléctrica, en cuyo caso, esta propuesta puede ofrecer este doble propósito. Entre los principales prototipos en desarrollo se encontraron los modelos ofrecidos por Corea del Sur, Rusia, Francia y EE.UU siendo los rusos, los más adelantados al contar ya con algunos puestos en marcha (Kang Heon Lee, 2015).

### **Los Ciclos de Generación más Comunes**

Los generadores de II Generación fueron los más construidos en el mundo, pero el principio de funcionamiento más utilizado para la generación es el ciclo PWR (Reactor de Agua a Presión). Actualmente se estima que unos 300 reactores de esta clasificación se encuentran en funcionamiento. Esta tendencia le ha permitido al ciclo PWR, ser objeto de constante evolución en seguridad, rendimiento y disponibilidad, dando origen a otras variantes a lo largo de las nuevas Generaciones (Incluyendo IV), por lo que el diseño PWR, se consolida como el de mayor porcentaje en implementación, lo que brinda un mayor número de experiencias en la aplicación de los diferentes sistemas y medidas que recomienda la OIEA.

Se cuenta con los mejores avances en este diseño en los países de EE.UU, Francia, Rusia y China (Pablo Fernández, 2020).

Siguiendo la idea anterior, entre los últimos adelantos de esta tecnología se encuentra los alcanzados para la prolongación de la vida útil de los reactores nucleares de ciclo PWR, los modernos avances en el desarrollo de materiales, le ha permitido proyectar una vida útil que ya pasa de 40 a 60 años, e incluso, los logros alcanzados por los estadounidenses en este diseño específico, permiten estimar incluso una vida útil de hasta 80 años, amortiguando con esto los costos de inversión inicial con una mayor etapa productiva para el retorno a la inversión, ganancias, y por supuesto, menor impacto final en la producción de CO<sub>2</sub> y desechos, que se generan del desmantelamiento de estas unidades (Pablo Fernández, 2020).

### **La Gestión de Residuos Nucleares**

Poniendo la vista ahora sobre la gestión de residuos nucleares, esta es una preocupación generalizada derivada del uso de este tipo de tecnologías, no obstante, pese a la complejidad del tratamiento de estos residuos, es importante dar a conocer que las cantidades que se producen no son equiparables con las cantidades de desechos resultado de la generación a partir del carbón. Mientras en una planta de IGW de producción se generan al año unas 25 toneladas de desechos nucleares (Combustible Gastado), en una planta a carbón se producen unas  $300 \times 10^3$  toneladas de ceniza, compuesta de metales pesados y tóxicos. Lo interesante es, que a pesar de que el uso de energía nuclear es muy criticado a causa de sus residuos, estos cuentan actualmente con tecnologías y programas avanzados para su manejo. Se ha concebido todo un proceso de pretratamiento, tratamiento, acondicionamiento y almacenaje para su posterior eliminación como parte de las políticas y estrategias que involucrarán tanto a actores estatales como no estatales, a su vez vigilados y orientados por la OIEA (Zoran Drace, 2022).

La tecnología para el tratamiento de desechos nucleares que se ha señalado continúa en constante evolución con el fin de reducir el nivel de peligro y volumen de los residuos. Actualmente la gestión de residuos la componen medios físicos, químicos y biológicos, aunque ninguna ofrezca en la actualidad una solución final. En contrapeso a lo anterior, los

desarrollos de I+D apuntan cada día más hacia la reutilización, reciclado y descontaminación de residuos, a través de los nuevos ciclos de combustible cerrado (IV Generación), que son en consecuencia mucho más económicos que los ciclos de combustible abierto utilizados en las generaciones anteriores (Perpiña, 2021).

Finalmente, Para dar conocer sobre los métodos actuales en la gestión de desechos, iniciemos hablando de los tratamientos físicos de residuos, estos son los más utilizados en el mundo, incluyen por ejemplo la cementación a profundidad (enterrados), la reducción del volumen (Incineración), y la eliminación de sales y metales pesados, se caracterizan por su eficiencia en la inmovilización de desechos, estabilidad y bajos costos operativos. En los métodos químicos, encontramos la oxidación, precipitación, osmosis e intercambio iónico, son especiales para el tratamiento de aguas contaminadas, por último, el método de biorremediación, juega un papel importante en la absorción y reducción de contaminantes a través de microorganismos o microbios con habilidades naturales para absorber estos contaminantes radiactivos (Gunjanaporn Tochaikul, 2022).

### **Situación Actual de la Regulación de la Energía Nuclear.**

Este Capítulo explora el ámbito regulatorio actual alrededor del uso pacífico de energía nuclear por los Estados, que tanto ha evolucionado los controles y que tan largo puede ser el recorrido previo desde la decisión de implementar un programa nuclear. Las salvaguardas son unas de las principales medidas adoptadas por la OIEA para verificar el buen uso de la energía nuclear, y su evolución es constante. Revisar el estado actual de estas salvaguardas, permitirá establecer que tan complejo puede ser concertar su aplicación y en ese sentido, si se pudiera comprometer la soberanía de la nación.

Por lo anterior, no se propone una evolución total hacia la energía nuclear como única fuente de generación eléctrica, sino de sumar una opción más a la diversificación de la producción disponible, basándonos en resultados que sugieren que una cartera eficiente entre costos, riesgos y disminución en las emisiones de CO<sub>2</sub> en el modelo europeo, se logra con la complementariedad de las energías renovables con las energías fósiles y la nuclear (Gustavo Marrero, 2010).

## **El Organismo Regulador**

La Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA) El organismo más relevante en la promoción del uso pacífico de la energía nuclear y de garantizar al mismo tiempo, que no se utilice con fines militares. Luego de la destrucción de dos ciudades de Japón por dos artefactos nucleares lanzados por los Estados Unidos a finales de la segunda guerra mundial, nace la OIEA teniendo como su primer antecedente el discurso «Átomos para la paz» del entonces presidente Dwight Eisenhower, en Asamblea General de las Naciones Unidas del 8 de diciembre de 1953, como parte de la política lanzada por los EE.UU para disminuir la tensión mundial sobre las consecuencias derivadas del mal uso que se le podría dar a este tipo de tecnologías (Dominguez, 2017).

La OIEA dentro de sus funciones realiza inspecciones a instalaciones, materiales e información de los programas de los países, y los derechos y obligaciones para estos se establecen a través de acuerdos. Hablando internacionalmente, solo a través de la OIEA se halla el único camino para construir confianza entre el resto de los países en el desarrollo de un programa nuclear. Para construir confianza los Estados acordaran acogerse a salvaguardas que incluyen el acceso a la vigilancia de la OIEA tanto de reactores, instalaciones, fábricas de combustible si las tiene y el tratamiento de residuos. La verificación de las actividades nucleares tiene una perspectiva holística donde el Estado se compromete a brindar toda la información de sus diferentes elementos relacionados con la actividad nuclear, que puede incluir el autorizar acceso de los sistemas de vigilancia automáticos a distancia, el libre tránsito de inspectores por el territorio, y la autorización para el empleo de medios tecnológicos como las imágenes satelitales (Jill Cooley, 2008).

Colombia es miembro del Organismo Internacional de Energía Atómica desde 1960 (OIEA, 2023), y de acuerdo con esto, se compromete a convenir la aplicación de las diferentes salvaguardas en cumplimiento de sus compromisos de acuerdo con el Tratado de no Proliferación de Armas Nucleares de 1968, entrado en vigor el 30 de abril de 1986 mediante la ley 114 del 16 de diciembre de 1985. Colombia ha venido dando, incorporando y venido cumpliendo con cada uno de los protocolos emitidos por la OIEA en materia nuclear como lo demuestra el informe del Ministerio de Minas y Energía (en adelante Mininería ) realizado al congreso, sobre el avance en el cumplimiento de convenios

internacionales del segundo semestre del 2015 (Minenergía, 2015). Los Estados miembros de la OIEA pueden contar con todo el apoyo y asesoría para el adecuado, seguro acceso y desarrollo de cada uno de los ciclos que componen la gestión nuclear.

### **Las Medidas de Control de la Operación Nuclear**

Para garantizar el uso pacífico de la energía nuclear, las salvaguardas son medidas de control ejercidas por parte de la OIEA sobre los Estados. Los adelantos más notables en esta son las imágenes satelitales, el uso de la robótica y ahora la Inteligencia Artificial. El asunto a tener en cuenta en este apartado, es que conforme evolucionan las salvaguardas y los protocolos de aplicación, estas pueden dar paso a vulneración de información en asuntos de Estado que constituyen una violación a la soberanía, ya que contemplan la futura aplicación de Inteligencia Artificial, capaz de integrar y analizar información que el Estado debe proporcionar mediante acceso autorizado a las fuentes automatizadas de información. Esto puede llegar a convertirse en una verdadera preocupación, toda vez si la política de ciberseguridad y ciberdefensa no posee una estructura tecnológica capaz de contrarrestar el acceso a información no autorizada (Teodor Nicula Golovei, 2022).

Otras regulaciones pueden llegar a ser tema de preocupación si limitan el acceso al Uranio enriquecido por parte de los Estados. Con la creación en el 2010 del banco de Uranio levemente enriquecido de Rusia, y el banco de Uranio de Kazajstán duran el 2011 previo visto bueno de la OIEA, el futuro de estas regulaciones o salvaguardas podría restringir el desarrollo tecnológico y por ende la capacidad de enriquecimiento de Uranio por parte de los Estados, al parecer, producto de las preocupaciones de las grandes potencias nucleares y la OIEA, de que la manipulación de este mineral pueda alcanzar niveles de concentración de uso militar. Lo cierto es que este tipo de restricciones de llegar darse, afectan la soberanía de una nación que tenga implementada la energía nuclear para producir energía eléctrica, con una notable participación dentro de las opciones de generación eléctrica (Sandra Colombo, 2017).

Otras medidas las determina el Manual de Derecho Nuclear, aquí se sugiere que el Estado tenga el monopolio fiscalizador de la actividad nuclear en el país, crear instituciones para atención única, especializadas e independientes encargadas de conceder o suspender

licencias, de la explotación de los yacimientos, tratamiento del uranio extraído y de la gestión del Uranio enriquecido. El Estado debe sugerir el marco regulatorio, asumir la supervisión, control y régimen sancionatorio de este, gestionar y evaluar el talento humano y promover el desarrollo de I+D. Para evitar malos usos, debe asumir las tareas en la gestión de residuos nucleares junto con su disposición final, y del desmantelamiento de Unidades nucleares, por último, establecer los planes de respuesta a emergencias. Se debe determinar que tareas se pueden agrupar o no para ser desarrolladas por una o varias instituciones y, además, establecer las relaciones con las instituciones existentes en el aparato estatal que participen o participaran en la vigilancia de la actividad nuclear (Carlton Stoiber, 2006).

### **Aspectos Importantes en la Regulación Nuclear**

Regular la explotación pacífica de la actividad nuclear no debería ser exclusividad al Estado dando paso a la inversión privada. Debe si existir una carga tributaria impuesta para el funcionamiento de la actividad nuclear, justificada regularmente bajo los principios de el que contamina paga, el que genera un riesgo paga y, por último, el principio de precaución. Entre estas cargas se puede encontrar por ejemplo aquellos recursos que se deberían recaudar durante la vida útil de la Planta con el fin de ser destinados a las labores de desmantelamiento al final de su vida útil. Sin embargo, se debe hacer un análisis juicioso de los riesgos, el grado de contaminación, la inversión inicial para cumplir las condiciones de seguridad, y el tiempo de vida proyectado, con el fin de que no se generen cargas tributarias que impacten en la rentabilidad, encarezcan el servicio o afecten la libertad de empresa y lo más importante, se debe verificar que los recursos recaudados realmente se estén empleando en el financiamiento de los riesgos asociados a la actividad nuclear y el cuidado del medio ambiente. (Díez Moreno, 2019).

### **Situación de Acceso al Uranio Enriquecido**

El Uranio está cerca de convertirse en un importante mineral, crítico para los sistemas productivos de aquellos países, que en el mediano plazo ven en la generación de energía eléctrica a partir de energía nuclear, una solución que por lo menos, dará la suficiente

garantía de sostener la economía hasta que se logre desarrollar de forma definitiva las alternativas a través de las energías limpias.

Tal y como sucedió con Estados Unidos y el petróleo luego de la segunda guerra mundial, los países ricos en Uranio, verán en su comercio la creciente preocupación por el cambio climático, el foco de una política exterior, y como consecuencia de la relevancia que este mineral podría llegar a tomar, es fácil intuir que el acceso comercial a este importante recurso energético, tendrá un comportamiento comercial creciente al futuro similar al mercado del petróleo, donde sus precios cada vez serían mayores conforme las reservas van disminuyendo y la demanda aumentando (López, 2008).

Es de gran importancia determinar si Colombia cuenta con reservas de este mineral, suficientes al menos para cubrir el tiempo de vida útil de una central nuclear, pues no sería viable invertir en una tecnología que no permitiera aprovechar los abundantes recursos con los que si cuenta Colombia. Los principios de la teoría del realismo expuesto por Max Weber, donde ‘‘toda estructura política, naturalmente prefiere, tener vecinos débiles, antes que fuertes’’ (Jiménez, 2003) y la premisa expuesta por Morgenthau en su definición del realismo en función del estatocentrismo y los intereses nacionales, dan aproximaciones que permite predecir cuáles serán las intenciones de los Estados en cuanto a negociar acuerdos comerciales en esta materia (Barbe, 1987), influyendo en la conveniencia o no de adquirir tecnología nuclear con fines pacíficos, debido a la dependencia comercial que se crearía a partir de la necesidad adquirir el Uranio enriquecido.

### **La Producción de Uranio**

Un temor existente es que algunos de los principales países productores de Uranio, en su mayoría poseen una estructura de gobierno con tendencias ideológicas autoritarias que han conducido a la presencia del terrorismo. A esta preocupación se suma que la producción anual cercana a las 60.000 toneladas de Uranio en todo el mundo, se concentran en Australia, Canadá y Kazajstán, y que representan dos tercios de la producción mundial de Uranio, esta situación daría fácilmente origen al nacimiento de un monopolio para el suministro de este material (Dixit, 2018).

Otros productores de Uranio son Rusia, Nigeria, Namibia y Uzbekistán, EE.UU, Ucrania, Sudáfrica y China, y los países que tienen mayor capacidad para producir Uranio enriquecido utilizado en la fisión nuclear, son Alemania, el Reino Unido y los Países Bajos (que forman el consorcio industrial URENCO), Francia (Eurodif), Rusia (Rosatom), Japón (JNFL) y EEUU (USEC). Como consecuencia, estos países tendrían ciertas ventajas económicas, tecnológicas y políticas que explotarían a su favor en el contexto realista de un nuevo escenario energético en reemplazo a las formas tradicionales conocidas (De Salazar G. , 2010).

Por otro lado los costos de producción lo determina la técnica de extracción de Uranio, entre las convencionales están la lixiviación in situ (46%), método por el cual el Uranio es solubilizado en profundidad y bombeado a la superficie sin remoción de material, le sigue la explotación subterránea con una participación del (29%), la minería a cielo abierto que proporciona el (18%), y el (7%) proviene como un subproducto, sin embargo en el escenario más favorable con el 50% de la producción actual, se lograría garantizar la operación actual de aproximadamente unos 435 reactores, lo que nubla un poco más la viabilidad de esta iniciativa en el momento que se disparen la construcción de nuevas centrales en el mundo (Lopez, 2016).

### **Acceso al Uranio**

El Grupo de Suministradores Nucleares creado en 1975, es el organismo encargado de regular las transferencias de tecnologías para evitar que esta sea utilizada en usos no sometidos a las salvaguardias (Nuclear Suppliers Group, 2022). A parte de la preocupación surgida por los atentados del 11 septiembre del 2001, se suma que el Tratado de No proliferación, no se ha ratificado por la totalidad de los países, entre estos India, Pakistán e Israel que se han dotado de armas nucleares. Otra preocupación son los casos de proliferaciones clandestinas surgidas como en Irak, Libia y Siria, y los casos de Irán y la República Democrática Popular de Corea con sus avances anunciados. Esto viene limitando el acceso a la tecnología por parte de los países que se encuentran en vía de desarrollo, las iniciativas actuales proponen que los países que cuentan con la tecnología para el enriquecimiento de Uranio se comprometan a proporcionarlo a través de mecanismos



internacionales. Situación que amenaza la autonomía energética y el posible surgimiento de un monopolio (De Salazar G. , 2012).

Un caso de estudio sería el conflicto ruso-ucraniano que inicio en el año 2021 y que continua en corrido de este año 2023, este materializo los temores sobre la dependencia comercial y la vulnerabilidad sobre las decisiones de estado por la comercialización del Uranio, ya que los países más nuclearmente dependientes están atados a la cadena de suministro que dependen de Rusia. Francia por ejemplo en el 2022 triplico las compras de Uranio a Rusia (Dogru, 2022), España y otros países como Hungría y República Checa, continúan adquiriendo de Rusia el Uranio, esto se debe a la calidad con la que los rusos procesan este mineral (Sandri, 2022), y por evitar lo enormes costos económicos, ambientales y de salud pública que genera la extracción de este mineral a causa de las legislaciones ambientales locales que han creado (Escribano, 2023).

En el caso particular de los Estados Unidos y sus planes de descarbonización, hace que el país dependa actualmente de la cadena de suministro de Uranio ruso, este y los casos mencionados en el apartado inmediatamente anterior, es a lo que se hace referencia con la perdida de decisiones de estado, en vista claro está que por este motivo de dependencia energética, las sanciones impuestas sobre el estado ruso no han logrado el efecto deseado sobre el conflicto ruso-ucraniano, pues, la comercialización de Uranio sigue y es una de las más fuertes fuentes de financiamiento del Estado ruso (Diaz, 2022).

### **Uranio en Colombia**

A partir de este momento se establecerá la situación de las reservas de Uranio en Colombia. Las investigaciones para determinar la existencia de minas de este mineral en Colombia empezaron en 1914 y las exploraciones como tal hasta el año de 1945, para el 2019, la única actividad minera de Uranio en Colombia se realiza en Samaná-Caldas por empresarios canadienses (Andres Porras, 2019). No obstante, la situación en cuanto a cifras concretas de reservas son por un lado relativamente bajas y por el otro algo especulativas (Portafolio, 2017), pero para hacernos una idea de cómo esta Colombia en este tema, la última publicación sobre las reservas de Uranio en el mundo, publicada por Asociación Mundial Nuclear (World Nuclear Association), muestra un listado de solo 16 países, donde Jordania

en el último lugar de ese listado, posee el 1% (52.500 Toneladas) de las reservas mundiales (World Nuclear Association, 2023).

El servicio geológico colombiano, asegura que existe un potencial minero para la recuperación de Uranio en los Departamentos de Santander, Norte de Santander y en Caldas (Servicio Geologico Colombiano, 2019). Otros estudios especializados de esta entidad advierten la presencia de Uranio (Huila y Boyaca) a partir de las concentraciones presentes en rocas sedimentarias fosforicas, El estudio se basó en un muestreo con resultados de entre 58 ppm (Partes Por Millón) y 102 ppm dando una tendencia media-alta al compararlo con depósitos mundialmente conocidos (Olger Mendoza, 2017).

Sin embargo, no deja de generar incertidumbre respecto a que tan grande pueden ser estos yacimientos en las zonas antes mencionadas en términos toneladas, se podrá estar siendo algo propositivo y quizás apresurado en lanzar cifras, sin perjuicio a lo anterior, tenemos por ejemplo las estimaciones que hace el estudio de la Universidad Nacional de Colombia del 2019 de alrededor de unas 217 mil toneladas de Uranio en estos departamentos (Andres Porras, 2019).

## **Mercado Regional de Energía Eléctrica.**

### **Colombia**

Según un estudio de la Universidad de la Rioja del 2018, el sistema de generación eléctrica en Colombia para entonces estaba compuesto en un 70% producto de la generación por fuente hidráulicas (Ricardo Moreno, 2018), estos datos fueron corroborados a la fecha (2023) en la página web del ministerio de energía, dejando como dato preliminar que el 30% restante de generación se produce a partir de recursos fósiles (Minineria, 2023). No obstante, al consultar (2023) el sitio web de ACOLGEN (Asociación Colombiana de Generadores de Energía Eléctrica), aquí se detalla la composición del mix de generación de energía eléctrica en la actualidad compuesta del 0,1% proveniente de energía solar, el 0,9% de la cogeneración, un 0,1% eólica, el 30,7% de energía térmica y el 68,3% restante proveniente de fuentes hidráulicas (ACOLGEN, 2023).

En cuanto al consumo de energía proveniente de combustibles fósiles, según el Plan Energético Nacional 2020-2050, para el 2019 el sector transporte consumía el 43% de la energía proveniente del Diesel en un 40% (Unidad de Planeación Minero Energética, 2019), señalemos en este punto además que en particular la flota naval colombiana se encuentra dentro de esta clasificación. En Colombia se ejecutan 17 proyectos de generación de energía eléctrica que usan combustibles fósiles como Carbón, Gas Natural y Diesel (ANLA, 2021) y en la Imagen 1, se puede apreciar la distribución de estas en el territorio colombiano, donde fácilmente se identifica zonas en el oriente y sur del país que se encuentran por fuera de esta cobertura, así como de una importante franja que corresponde a la zona del pacifico colombiano (UPME, 2019).

Ilustración 1, *Plan de Transferencia Eléctrica Colombia 2019.*



Nota: Elaborado por Unidad de Planeación Minero Energético, 2019, tomado de <http://sig.simec.gov.co/GeoPortal/Mapas/Mapas>

El Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026, propone una clara y necesaria transformación de las fuentes de producción energéticas, y entre sus iniciativas resalta el desarrollo de ciencia, tecnología e innovación en energías limpias, que busquen la preservación de la biodiversidad, y ante todo, que vaya de la mano del concepto de sostenibilidad y gasto presupuestal eficiente (Presidencia, 2022).

Sin embargo, en algunos modelos de generación eléctrica propuestos en el plan de desarrollo como el eólico y el solar, que podrían ser los ideales para aplicar en las zonas del norte y oriente del país hoy con sistemas de generación deficientes, costosos, contaminantes e incluso dependientes, requiere aun definir variables determinantes en su desarrollo como los elementos claves para el almacenamiento y transmisión. Minerales como el aluminio, cobre, litio níquel y cobalto considerados estratégicos e indispensables en este proceso, son también altamente demandados por otras grandes potencias mundiales, y en el caso colombiano, poseen algunas amenazas para el ambiente durante su extracción (Quintero, 2023).

El decreto 0381 del 16 de febrero del 2012 (Minenergía, 2012), le da la autoridad nacional sobre la emisión de políticas relacionada con el uso de energía nuclear. Dentro del plan energético nacional 2020-2050, se contempla en el escenario más allá del 2042, dar entrada a fuentes de energía bajas en emisiones como la nuclear, dando impulso a su investigación, pero reconociendo sus potenciales peligros (Minenergía, 2020). Sin embargo, el FAZNI que es el fondo de apoyo financiero para la energización de zonas no interconectadas, que coinciden con las mismas con potencial para la aplicación de proyectos con generación de energía nuclear, actualmente vienen desarrollando inversiones más enfocadas hacia la producción de energía eléctrica a partir de proyectos eólicos y con la utilización de paneles solares (Sala de Prensa Minienergía, 2023).

## **Ecuador**

El mercado regional ofrece oportunidades de retorno a la inversión inicial en un proyecto de generación con energía nuclear, con el potencial comercio internacional de energía eléctrica alrededor de las fronteras regionales de Colombia (Banco Mundial, 2022). En el Ecuador por ejemplo, donde el 39, 25% de su generación eléctrica proviene de fuentes no renovables, en especial el petróleo con un 88% (H2lac.org, 2023), anotando además que ya

existe un comercio actual de importación de electricidad desde Colombia (CELEC EP, 2018).

## **Perú**

En el caso peruano, su matiz de generación eléctrica en la actualidad se compone de un 56,09% provenientes de Termoeléctricas, un 38,70% de Hidroeléctrica, otro 3,08% de fuente Eólica y un 2,13% de fuente solar. En este escenario los resultados sobre sus estudios de demanda futura y nuestra cercanía, también abre posibilidades comerciales (COES.org.pe, 2023). No obstante, el Proyecto de Ley N° 0521 que trata de la interconexión internacional de los sistemas eléctricos y el intercambio de electricidad, establece ya la posibilidad para Perú, de que esos Estados de frontera no interconectados con su red nacional, podrán interconectarse con otros países, abriendo así oportunidades para la frontera colombiana (Matos, 2016).

## **Aplicación Naval Militar: Propulsión de Submarinos y Plataformas de Superficie.**

No existe ningún anuncio hecho por Colombia, que indique su intención de desarrollar tecnología nuclear para construir armas como medio disuasivo de defensa. Lo que sí es relevante en el uso de esta tecnología, es su aprovechamiento en bajas emisiones, los adelantos obtenidos con los generadores de IV generación y la necesidad de bajar los costos de operación (Combustibles) actuales, que tienen las Unidades Navales, que a propósito del fallo de haya emitido el pasado 13 de julio del 2023 (Salazar, 2023), son ahora indispensables para realizar cobertura de los 928.660 km<sup>2</sup> de territorio marítimo que conforman la nación.

### **Uso en la Propulsión de Submarinos**

Sin olvidar las ventajas operacionales que daría a los submarinos al mejorar su desempeño táctico cuando se reduce los momentos de emerger para cargar baterías (Gomez, 2016), se suma al aumento de la autonomía en la navegación que incluso podría aplicarse a las plataformas de superficie (Taylor, 2009), minimizando así el impacto que tiene los factores

LITI (localizado, Imperfecto, Temporal e Incompleto) sobre operaciones de ejercicio del control del mar.

El submarino convencional funciona regularmente con combustible Diesel, dependiendo de la capacidad de almacenaje de este, dependerá su autonomía, pueden ser ruidosos en determinados momentos operacionales y el resultado de los gases de combustión debe salir donde al mezclarse con el agua de mar genera contaminación. Como consecuencia de este principio de funcionamiento se tiene que no pueden alcanzar grandes profundidades en comparación con los impulsados nuclearmente (Piwowarski, 2013).

### **Uso en la Propulsión de Unidades de Superficie**

La propulsión convencional que actualmente se usa en Unidades de Superficie, hace parte de esos focos de generación de gases con efecto invernadero a través de los sistemas de escape. Estos motores expulsan dióxido de carbono, óxido de nitrógeno y monóxido de carbono. Al respecto el Convenio MARPOL 73/78, crea las regulaciones para la prevención de la contaminación atmosférica en buques, adoptado por la OMI (Organización Marítima Internacional), es una clara invitación no a prescindir de la utilización de las Unidades de Superficie, si no a optimizar sus sistemas de propulsión. La energía nuclear y su IV generación ya desarrollada, aunque requiera condiciones de diseño más reforzadas abordo de un buque que en tierra, ofrece mejor desempeño en cuanto a empuje, durabilidad y regularidad con respecto a otras propuestas como la Solar, Pilas de Combustible, Turbinas a Gas, o eólicas mediante sistemas de Cometa tractora SkySail, y por supuesto, ofrece menos contaminación y peso en el combustible a comparación de las convencionales (Díaz, 2018).

### **Conclusiones**

Las emisiones de gases contaminantes producto del consumo de combustible nuclear son mucho más bajas en consideración con las cantidades que produce el consumo de petróleo, gas y carbón durante la generación de electricidad, esto debe ser considerado viable en el contexto ambiental actual para considerar el uso de la energía nuclear en la transición energética colombiana. Sin embargo, se puede decir que en la medida que esta estrategia

tenga un impacto positivo y se logre consolidar como fuente de generación, su viabilidad debe considerar también una adecuada gestión de los residuos nucleares, aprovechando que esta produce menos cantidades de desechos en comparación a otras fuentes de energía.

Se ha logrado identificar toda una literatura en manuales, procedimientos y protocolos de seguridad, basados en una recopilación amplia de experiencias vividas por más de 70 años desde que entró en funcionamiento el primer reactor nuclear, siendo documentadas y puestas a disposición junto con el debido asesoramiento y acompañamiento del organismo internacional de energía atómica, para que los Estados que han suscrito los diferentes tratados de uso pacífico de energía nuclear, como es el caso de Colombia, cuenten con garantías suficientes en la implementación de un programa de energía nuclear.

La viabilidad de implementar energía nuclear en Colombia requiere de considerar los antecedentes sísmicos a fin de no comprometer la integridad física de este tipo de instalaciones, existe riesgo en el país especialmente sobre región central por los constantes movimientos subterráneos que se presentan, por lo que se puede concluir que las zonas más viables para la construcción y operación de este tipo de instalaciones nucleares están ubicadas al norte, oriente y sur del país.

La incorporación de nuevas salvaguardas o protocolos de seguridad de corte tecnológico que la OIEA viene estructurando, pueden llegar a vulnerar la soberanía nacional de no contarse con la tecnología adecuada para resguardar la información digitalizada. Hoy día los países más desarrollados ya han avanzado mucho en Inteligencia Artificial y Computación Cuántica. La viabilidad de implementar energía nuclear teniendo en cuenta este aspecto, requiere mantener en Colombia una política de ciberdefensa que en constante perfeccionamiento, para asegurar la información sensible de estado frente a accesos no autorizados de la Inteligencia Artificial.

La situación actual de acceso al Uranio por parte de Colombia, podría impactar en la viabilidad del uso de energía nuclear, esta aumentaría toda vez que los estudios con los que actualmente se cuentan, se renueven y den una evidencia más concreta de la cantidad de Uranio presente en los yacimientos identificados, de lo contrario, Colombia entraría en una situación de dependencia energética como la que viven los países de Francia y España,

debiendo recurrir a fortalecimiento de sus actuales relaciones e influencias internacionales en otros aspectos que le permitan equilibrar la balanza frente a las decisiones de estado de otras naciones.

Colombia necesita adoptar tecnológicas para hacer viable la implementación de un programa nuclear. El temor a la proliferación que aún persiste, y el acceso a las reservas mundiales existentes de Uranio, motivan a las grandes naciones avanzadas en el uso de tecnología nuclear, a querer tomar control total del desarrollo tecnológico de instalaciones y tratamiento de los recursos que la impulsan. En este sentido Colombia, es un país comprometido con la firma y el cumplimiento de los diferentes tratados internacionales referentes a los controles para la no proliferación de armas nucleares, dando suficiente confianza ante el sistema internacional para su acceder a su transferencia.

Se ha logrado determinar que uno de los factores que rodean la falta de desarrollo de energía nuclear en Colombia, es el poco conocimiento e investigación sobre esta, el plan energético de Colombia 2020-2050, reconoce que se debe invertir más en desarrollo de I+D sin embargo, para lograr que esto sea viable, el estado debe diseñar estrategia para promover su uso seguro en la sociedad colombiana e impulsar su estudio, mediante una fuerte difusión de las ventajas que ofrece frente a otras alternativas de generación, el bajo impacto ambiental y la fiabilidad de su funcionamiento, generando confianza en la ciudadanía al reconocer además en el talento humano colombiano, la capacidad profesional para apropiarse y dominar este tipo de tecnología como lo han hecho los países de sur América de Brasil y Argentina.

Como se observó en la imagen 1 de este apartado, Existe una necesidad identificada en zonas al norte, oriente y sur del país, que hacen viable la opción nuclear para mejorar la capacidad y cobertura eléctrica, y que además es una necesidad sentida en otros países colindantes con Colombia. Se requiere explotar esta oportunidad que da el uso de energía nuclear y dar mayor fuerza al mercado de energía eléctrica con Ecuador, y de abrir uno nuevo en la frontera con el Perú, no después que, a falta de esta solución, impulse a estos países a cubrir esta necesidad con sus propios medios perdiéndose una valiosa oportunidad comercial para la energía nuclear en nuestro país.



Los nuevos avances evolutivos de la tecnología nuclear, las novedosas medidas de control, sumado a un futuro agotamiento de los combustibles fósiles y la necesidad invaluable de emplear energías amigables con el medio ambiente, dan argumentos y garantías viables suficientes para que Gobierno colombiano pueda iniciar ya con su proyecto de incorporación de energía nuclear para la generación eléctrica, pero también es importante resaltar, una vez consolidado su dominio, es viable emplear está en su uso como medio para la propulsión de Unidades Navales mejorando así el desempeño sostenible de estos.

Finalmente, en los resultados de este apartado en cuanto a las desventajas que se logran identificar durante su desarrollo, estas no pueden ser abordadas erróneamente como un dilema para decretar la inviabilidad. El pensamiento que hoy propone la filosofía progresista invita a afrontar estos inconvenientes como aquellos retos u obstáculos que deben superarse, solucionarse, mitigarse o controlarse para salir adelante y dar viabilidad al proyecto, lo que le dará el impulso a la economía y la defensa colombiana gracias a un sistema energético amplio, robusto y confiable.

## **Bibliografía**

- ACOLGEN. (2023). *ACOLGEN*. Obtenido de <https://acolgen.org.co/>
- Andres Porras, J. D. (2019). El uranio como recurso energético y su actualidad minera en Colombia. *DYNA*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/496/49660955045/49660955045.pdf>
- ANLA. (2021). *Informe de Auditoria de Cumplimiento Autoridad Nacional de Licencias Ambientales*. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/02/Informe-Auditoria-de-cumplimiento-a-las-disposiciones-ambientales-en-la-Operacion-de-Centrales-Termoelectricas.pdf>
- Banco Mundial. (26 de Septiembre de 2022). *Banco Mundial*. Obtenido de <https://www.bancomundial.org/es/topic/energy/overview#1>
- Barbe, E. (1987). El Papel del Realismo En Las Relaciones Internacionales. *Revista de Estudios Políticos (Nueva Epoca)*, 149-176.
- Bohigas, X. (2017). Centrales nucleares, emisiones de CO2 y cambio climático. *Papeles de relaciones ecosociales y cambio global*, 109-121. Obtenido de <https://www.fuhem.es/wp-content/uploads/2018/12/CentralesNucleares-Emisionhes-CambioClimatico-X.Bohigas.pdf>

- Cano, N. (2019). Estudio de Prefactibilidad Para Una Central de Energía Nuclear en Honduras. *Universidad Tecnológica Centroamericana*. Obtenido de <https://repositorio.unitec.edu/xmlui/bitstream/handle/123456789/11393/21341068-junio2019-i-12-pi.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Carlton Stoiber, A. B. (2006). *Manual de Derecho Nuclear*. Organismo Internacional de Energía Atómica. Obtenido de [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1160s\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1160s_web.pdf)
- CELEC EP. (2018). *Corporacion Electrica del Ecuador*. Obtenido de <https://www.celec.gob.ec/plan-maestro-de-electricidad/>
- Chudakov, M. (Septiembre de 2016). *Organizacion Internacional de Energia Atomica*. Obtenido de [https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull57-3/5731718\\_es.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull57-3/5731718_es.pdf)
- COES.org.pe. (2023). *Comite de Operacion Economica del Sistema*. Obtenido de <https://www.coes.org.pe/Portal/Planificacion/PlanTransmision/ActualizacionPTI#>
- De Salazar, G. (2010). El Desarrollo de Energia Nuclear y Los Riesgos de Proliferacion: El Caso de Iran. *Real Instituto del Cano*. Obtenido de <http://biblioteca.ribei.org/id/eprint/1920/1/ARI-156-2010.pdf>
- De Salazar, G. (2012). El tratado de no proliferación de armas nucleares, El nuevo ciclo de examen y la comisión preparatoria de 2012. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7468933>
- Diaz, J. (2022). La empresa rusa no sancionada por la invasión de Ucrania porque es vital para el mundo. *El confidencial*. Obtenido de [https://www.elconfidencial.com/tecnologia/novaceno/2022-10-25/uranio-rusia-eeuu-energia-nuclear\\_3511362/](https://www.elconfidencial.com/tecnologia/novaceno/2022-10-25/uranio-rusia-eeuu-energia-nuclear_3511362/)
- Díaz, S. (2018). *Energia Nuclear Para La Propulsion Naval*. Universidad de Cantabria. Obtenido de <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/13352/D%C3%ADaz+Vejo,+S+usana.pdf?sequence=1>
- Díez Moreno, M. d. (2019). *Fiscalidad de la energía nuclear*. Universidad Carlos III de Madrid. Obtenido de [https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/29837/Tesis\\_maria\\_angeles\\_diez\\_moreno\\_2020.pdf?sequence=1](https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/29837/Tesis_maria_angeles_diez_moreno_2020.pdf?sequence=1)
- Dixit, A. (2018). *IAEA*. Obtenido de [https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull59-2/5920809\\_es.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull59-2/5920809_es.pdf)
- Dogru, A. (2022). Francia habría adquirido el triple de uranio de Rusia este año que en 2021 a pesar de las sanciones. *Agencia Anadolu*. Obtenido de <https://www.aa.com.tr/es/mundo/francia-habr%C3%ADa-adquirido-el-triple-de-uranio-de-rusia-este-a%C3%B1o-que-en-2021-a-pesar-de-las-sanciones/2758890>

## Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”

Bogotá D.C., Colombia

- Dominguez, J. M. (2017). El Organismo Internacional de Energía Atómica, (OIEA): 60 años de claroscuros en la búsqueda, por la paz y la seguridad internacionales. *Revista de Relaciones Internacionales de la UNAM*(129), 59-86. Obtenido de file:///C:/Users/LENOVO%20IDEAPAD%2033OS/Downloads/mich\_e,+63232-184004-1-CE%20(1).pdf
- Escribano, G. (2023). *Real Instituto el Cano*. Obtenido de <https://www.realinstitutoelcano.org/analisis/uranio-la-otra-cadena-critica-de-valor/>
- Fisher, M. (2017). *OIEA*. Obtenido de <https://www.iaea.org/sites/default/files/5841819es.pdf>
- Francisco Alvares, P. L. (Mayo de 2012). Valuación económica de proyectos energéticos mediante opciones reales: el caso de energía nuclear en México. *Ensayos, Revista de Economía*., XXXI(1), 95. Obtenido de <https://ensayos.uanl.mx/index.php/ensayos/article/view/71/57>
- Gomez, N. (2016). Nuclear Propulsion Systems: A Comparative Assessment of Manned Nuclear Submarines. Yale University. Obtenido de [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/65006028/Nuclear\\_propulsion\\_systems\\_A\\_comparative\\_assessment\\_of\\_manned\\_nuclear\\_submarines-libre.pdf?1606088823=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DNuclear\\_Propulsion\\_Systems\\_A\\_Comparative.pdf&Expires=16](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/65006028/Nuclear_propulsion_systems_A_comparative_assessment_of_manned_nuclear_submarines-libre.pdf?1606088823=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DNuclear_Propulsion_Systems_A_Comparative.pdf&Expires=16)
- Gonzalo Jumenez Varas, J. P. (2011). Sostenibilidad energética a largo plazo. El papel de la fusión nuclear. *Nuclear España*, 36-42. Obtenido de [https://oa.upm.es/11400/1/INVE\\_MEM\\_2011\\_104776.pdf](https://oa.upm.es/11400/1/INVE_MEM_2011_104776.pdf)
- Gunjanaporn Tochaikul, A. P. (2022). Radioactive waste treatment technology: a review. *Kerntechnik* , 208-225. Obtenido de [https://www.researchgate.net/profile/Gunjanaporn-Tochaikul/publication/358582623\\_Radioactive\\_waste\\_treatment\\_technology\\_a\\_review/links/620ced237c8b166ad07f86d6/Radioactive-waste-treatment-technology-a-review.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Gunjanaporn-Tochaikul/publication/358582623_Radioactive_waste_treatment_technology_a_review/links/620ced237c8b166ad07f86d6/Radioactive-waste-treatment-technology-a-review.pdf)
- Gustavo Marrero, L. P. (2010). Riesgos y Costes Medios en la Gneracion de Electricidad; Diversificacion e Implicaciones de Politica Energetica. *Fundacion de Estudios de Economia Aplicada*. Obtenido de <https://www.fedea.net/documentos/pubs/ee/2010/13-2010.pdf>
- H2lac.org. (2023). *Plataforma Para el Desarrollo de Nitrogeno Verde en Latinoamerica y el Caribe*. Obtenido de <https://h2lac.org/paises/ecuador/#:~:text=La%20composici%C3%B3n%20de%20generaci%C3%B3n%20de,limpia%20por%20medio%20de%20hidroel%C3%A9ctricas>.
- Jawerth, N. (2020). ¿Qué es la transición a una energía limpia y cómo encaja la energía nucleoelectrica? *Boletin de la OIEA*. Obtenido de <https://www.iaea.org/sites/default/files/6130405es.pdf>
- Jill Cooley, T. R. (2008). Energía Nuclear y No Proliferación, el Papel de la Organización Internacional de la Energía Atómica. *Economía Industrial*, 27-33. Obtenido de <https://www.mincotur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/369/27.pdf>

**Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”**  
Bogotá D.C., Colombia

- Jiménez, C. (2003). Las Teorías de la Cooperación Internacional dentro de las Relaciones Internacionales. *Polis*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/726/72620305.pdf>
- Kang Heon Lee, M. G. (2015). Recent Advances in Ocean Nuclear Power Plants . *Energies*. Obtenido de <https://www.mdpi.com/1996-1073/8/10/11470>
- Liou, J. (2021). *¿Qué son los reactores modulares pequeños (SMR)?* OIEA. Obtenido de <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/que-son-los-reactores-modulares-pequenos-smr>
- López, J. (2008). Geopolítica Del Petróleo y Crisis Mundial. Obtenido de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/1788/2445>
- Lopez, L. (2016). Una mirada al uranio como combustible para la energía nuclear. *Hojitas de Conocimiento, Centro nacional de Energía Atomica Argentina*. Obtenido de [https://www.cnea.gov.ar/nuclea/bitstream/handle/10665/1101/cnea\\_mdidact\\_ieds\\_hojitas\\_energia-15\\_p113-114.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.cnea.gov.ar/nuclea/bitstream/handle/10665/1101/cnea_mdidact_ieds_hojitas_energia-15_p113-114.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Luis Duran, S. L. (2022). Pequeños reactores modulares: el futuro de la energía nuclear. *Revista Digital del CEDEX*. Obtenido de <http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/2468/2069>
- Martinez, C. (2017). Reactores Nucleares de IV Generacion. *Universitat Politecnica de Catalunya*. Obtenido de [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/105472/Martinez\\_Moreno\\_Carolina\\_TFG-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/105472/Martinez_Moreno_Carolina_TFG-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Matos, M. (2016). Integración Eléctrica: ¿Perú, un país exportador e importador de energía eléctrica? *Enfoque Derecho*. Obtenido de <https://www.enfoquederecho.com/2016/06/01/integracion-electrica-peru-un-pais-exportador-e-importador-de-energia-electrica/#:~:text=El%20Proyecto%20de%20Ley%20N,en%20el%20marco%20de%20organizaciones>
- Minenergía. (2012). *Ministerio de Minas y Energía*. Obtenido de [https://www.minenergia.gov.co/documents/7511/22620-11399\\_M5oMykV.pdf](https://www.minenergia.gov.co/documents/7511/22620-11399_M5oMykV.pdf)
- Minenergía. (2015). *www.minenergia.gov.co*. Obtenido de [https://www.minenergia.gov.co/documents/7531/INFORME\\_CANCILLERIA\\_febrero\\_2016-1.pdf](https://www.minenergia.gov.co/documents/7531/INFORME_CANCILLERIA_febrero_2016-1.pdf)
- Minenergía. (2020). *Ministerio de Minas y Energía*. Obtenido de [https://www.minenergia.gov.co/documents/7511/22620-11399\\_M5oMykV.pdf](https://www.minenergia.gov.co/documents/7511/22620-11399_M5oMykV.pdf)
- Minenergía. (2023). Obtenido de Ministerio de Energía: <https://www.minenergia.gov.co/es/misional/energia-electrica-2/>
- Nuclear Suppliers Group. (2022). *Grupo de Suministradores Nucleares*. Obtenido de <https://www.nuclearsuppliersgroup.org/es/sobre-el-gsn>

- OIEA. (2023). Obtenido de <https://www.iaea.org/es/el-oiea/lista-de-estados-miembros>
- OIEA. (2023). *Organismo Internacional de Energía Atómica*. Obtenido de <https://www.iaea.org/es/temas>
- Olger Mendoza, L. T. (2017). *Servicio Geológico Colombiano*. Obtenido de [https://recordcenter.sgc.gov.co/B23/823\\_2023UfosfatosHuilaBoyacaSantander/Documento/Pdf/UfosfatosHuilaBoyacaSantander.pdf](https://recordcenter.sgc.gov.co/B23/823_2023UfosfatosHuilaBoyacaSantander/Documento/Pdf/UfosfatosHuilaBoyacaSantander.pdf)
- Pablo Fernández, D. V. (2020). A Global Review of PWR Nuclear Power Plants. *Applied Sciences*. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/13/4434>
- Perpiña, S. (2021). Reactores Nucleares del Futuro. Camino a la Sostenibilidad a Largo Plazo de la Energía Nuclear. Obtenido de <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/47244/TFG-I-1860.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Piwowski, M. (2013). Analisis de los Sistemas de Propulsion de Turbinas en Submarinos Nucleares. Obtenido de [https://www.researchgate.net/profile/Marian-Piwowski-2/publication/271576816\\_The\\_Analysis\\_of\\_Turbine\\_Propulsion\\_Systems\\_in\\_Nuclear\\_Submarines/links/5576d4ab08ae75363752a20e/The-Analysis-of-Turbine-Propulsion-Systems-in-Nuclear-Submarines.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Marian-Piwowski-2/publication/271576816_The_Analysis_of_Turbine_Propulsion_Systems_in_Nuclear_Submarines/links/5576d4ab08ae75363752a20e/The-Analysis-of-Turbine-Propulsion-Systems-in-Nuclear-Submarines.pdf)
- Portafolio. (2017). Colombia comienza a destapar los yacimientos de uranio. *Portafolio*. Obtenido de <https://www.portafolio.co/negocios/colombia-explora-sus-reservas-de-uranio-503210>
- Presidencia. (2022). *Plan Nacional de Desarrollo "Colombia Potencia mundial de la Vida"*. CNP. Obtenido de [https://www.cnp.gov.co/Documents/Concepto%20CNP%20BASES%20PND%202022%202026\\_compressed.pdf](https://www.cnp.gov.co/Documents/Concepto%20CNP%20BASES%20PND%202022%202026_compressed.pdf)
- Quintero, D. (2023). Minerales Para La Transición Energética en Colombia: Un Camino Incierto . *El Espectador*. Obtenido de <https://www.elespectador.com/investigacion/minerales-para-la-transicion-energetica-en-colombia-un-camino-incierto/>
- Ricardo Moreno, Y. L. (2018). Escenario de Desarrollo Energético Sostenible en Colombia 2017-2030. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6802203>
- Robert Whitcomb, M. S. (2000). Accidentes de Reactores Nucleares. Obtenido de [https://bancos.salud.gob.ar/sites/default/files/2018-10/0000001203cnt-2006\\_impacto-desastres-en-salud-publica.pdf#page=407](https://bancos.salud.gob.ar/sites/default/files/2018-10/0000001203cnt-2006_impacto-desastres-en-salud-publica.pdf#page=407)
- Sala de Prensa Minienergía. (2023). *Noticias*. Obtenido de <https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/>
- Salazar, C. (2023). Así quedó la delimitación marítima entre Colombia y Nicaragua tras el fallo de La Haya. *infobae*. Obtenido de <https://www.infobae.com/colombia/2023/07/13/asi-queda-la-delimitacion-maritima-entre-colombia-y-nicaragua-tras-el-fallo-de-la-haya/>
- Sandra Colombo, C. G. (2017). El desarrollo nuclear de Argentina y el régimen de no Proliferación. *Perfiles Latinoamericanos*.

## Escuela Superior de Guerra “General Rafael Reyes Prieto”

Bogotá D.C., Colombia

- Sandri, P. M. (2022). España compra un tercio de su combustible nuclear a Rusia. *La Vanguardia*. Obtenido de <https://www.lavanguardia.com/economia/20220328/8156913/energia-nuclear-centrales-espana-europa-rusia-guerra-uranio.html>
- Servicio Geologico Colombiano. (2019). Recursos Minerales de Colombia Vol 1. Ministerio de Minas y Energia. Obtenido de <https://libros.sgc.gov.co/index.php/editorial/catalog/view/35/23/386>
- Taylor, P. (2009). Porque Brasil Necesita Submarinos Nucleares? *Proceedings Magazine*. Obtenido de <https://www.centronaval.org.ar/boletin/BCN824/824estelasajenas-submarino.pdf>
- Teodor Nicula Golovei, J. W. (2022). La evolución de la tecnología de salvaguardias. Obtenido de <https://www.iaea.org/sites/default/files/6331415es.pdf>
- Unidad de Planeacion Minero Energetica. (2019). *Plan Energetico Nacional 2020-2050*. UPME. Obtenido de [https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN\\_documento\\_para\\_consulta.pdf](https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN_documento_para_consulta.pdf)
- UPME. (2019). *simec.gov.co*. Obtenido de <http://sig.simec.gov.co/GeoPortal/Mapas/Mapas>
- Veiga, M. E. (2016). *Análisis de la reglamentación europea, promulgada a raíz de los accidentes nucleares, y la determinación de la emisión gamma en alimentos importados*. Universidad Complutense de Madrid.
- World Nuclear Association. (Mayo de 2023). *World Nuclear Association*. Obtenido de <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/world-uranium-mining-production.aspx>
- Zoran Drace, M. I. (2022). Challenges in Planning of Integrated Nuclear Waste Management. *Sustainability*. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/21/14204>