

Prefactibilidad de implementación de un pequeño reactor modular para generación de energía eléctrica en un campo petrolero

Prefeasibility of implementing a small modular reactor for electric power generation in an oil field.

Alison Pérez¹, Hermes Llanes¹

Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares, 8, 2026

Recibido: 21 de abril de 2026

Aceptado: 20 de agosto de 2026

Publicado en línea: 9 de septiembre de 2026

DOI: <https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.8.2026.771>



Esta obra está bajo licencia internacional Creative Commons Reconocimiento 4.0.

Citación: A. Perez, H. Llanes, “Prefactibilidad de implementación de un pequeño reactor modular para generación de energía eléctrica en un campo petrolero”, Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares, n.º 8, 2026

Resumen

En el marco de un trabajo de grado en la Maestría en Energías Renovables de la Universidad del Rosario [1], se realizó un estudio de prefactibilidad para la implementación de un pequeño reactor modular (SMR, por sus siglas en inglés) para generación continua, baja en emisiones y de alta disponibilidad de energía eléctrica, en las operaciones de producción de un campo de producción de crudo donde la mitad de su energía proviene de combustibles fósiles, con el objetivo de descarbonizar la matriz energética y lograr la reducción de emisiones de CO₂. El estudio incluyó: (i) revisión de la regulación nuclear existente en el país y de las recomendaciones de Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) en la materia; (ii) un estudio de prefactibilidad de la implementación del SMR con la infraestructura existente en un campo petrolero que revise la compatibilidad técnica y la posibilidad de reemplazar una fuente de energía fósil por otra con menores emisiones de CO₂; y (iii) un análisis de la seguridad en la operación en las condiciones de carga operativa del campo petrolero y ante diferentes modos de falla.

El reactor seleccionado es el módulo VOYGR® de Nuscale, de 77 MWe, considerando los 6 parámetros de la NEA/OCDE y la sustitución de combustible fósil del campo petrolero como casos planteados en la industria petrolera de Canadá. Se estimó una reducción de emisiones de 194 mil TON CO₂e/año, con beneficios económicos anuales del orden de MUSD\$62,6 y que apalancan la inversión con un tiempo de recuperación menor a 5 años, lo que confirma los beneficios de la tecnología vistos en el marco teórico.

¹ Universidad del Rosario. Maestría en Energías Renovables. Autor para correspondencia: hermes.llanes@urosario.edu.co; alison.perez@urosario.edu.co

Para sustentar la estimación de ese tiempo de recuperación, se realizó un análisis de sensibilidad considerando variaciones en el precio del MWh (entre 52 y 120 USD/MWh), tasa de descuento (5 %-10 %) y factores de planta (85 %-95 %). Se encontró que bajo el escenario base (LCOE de 65 USD/MWh, tasa de descuento del 7 % y factor de planta del 93 %), el retorno de la inversión es de 4.7 años y en un escenario adverso (precio bajo y 85 % de disponibilidad), el tiempo de retorno se extiende a 7.2 años. Esto confirma que, incluso en condiciones conservadoras, la inversión es financieramente atractiva para sustitución de generación fósil en campos petroleros.

El análisis del comportamiento de la potencia del reactor ante eventos transitorios permitió demostrar que el reactor no solo es seguro desde su ingeniería, sino que, con las condiciones de carga del campo petrolero, también lo es. Se identificó que el reactor opera con altos estándares de seguridad al servicio de la industria petrolera, lo que garantiza un apagado rápido y seguro ante la presencia de diferentes modos de falla. Esto permitiría configurar una matriz eléctrica diversificada y resiliente ante desafíos climáticos, así como de suministro de combustibles fósiles.

Palabras clave: Pequeño reactor modular, energía eléctrica, energía fósil, industria petrolera, costo nivelado de energía (LCOE), reactor nuclear.

Abstract

As part of a master's thesis conducted within the master's program in renewable energy at Universidad del Rosario [1], a pre-feasibility study was carried out to evaluate the implementation of a Small Modular Reactor (SMR) for the continuous, low-emission, and highly reliable generation of electricity to support the production operations of an oil field, where approximately half of the energy demand is currently supplied by fossil fuels. The objective was to decarbonize the energy mix and achieve a reduction in CO₂ emissions.

The study included: (i) a review of the existing nuclear regulatory framework in Colombia and the recommendations issued by the International Atomic Energy Agency (IAEA); (ii) a pre-feasibility assessment of SMR deployment within the existing infrastructure of an oil field, examining technical compatibility and the potential for replacing a fossil-based energy source with an alternative characterized by significantly lower CO₂ emissions; and (iii) an analysis of operational safety under the oil field's load conditions and various failure scenarios.

The selected reactor technology was the NuScale VOYGR® 77 MWe module, based on the six evaluation parameters established by the OECD Nuclear Energy Agency (NEA/OECD) and considering fossil fuel replacement scenarios like those proposed for the Canadian oil industry. The study estimated an emissions reduction of 194 thousand tCO₂e per year, together with annual economic benefits of about USD 62.6 million, supporting the investment with a payback period of less than five years and thereby confirming the advantages of the technology identified in the theoretical framework.

To support the payback period estimate, a sensitivity analysis was conducted considering variations in electricity prices (52-120 USD/MWh), discount rates (5 %-10 %), and capacity factors (85 %-95 %). Under the base-case scenario (LCOE of 65 USD/MWh, 7 % discount rate, and 93 % capacity factor), the investment payback period was estimated at 4.7 years. Under an adverse scenario characterized by lower electricity prices and 85 % plant availability, the payback period increased to 7.2 years. These results indicate that, even under conserva-

tive assumptions, the investment remains financially attractive for replacing fossil-fuel-based power generation in oil fields.

The analysis of reactor power behavior under transient events demonstrated that the reactor is not only inherently safe by design but also operates safely under the specific load conditions of the oil field. The study found that the reactor meets high safety standards for deployment in the petroleum industry, ensuring rapid and safe shutdown in the event of various failure modes. This capability would enable the development of a diversified and resilient electricity generation portfolio, better equipped to address climate-related challenges and uncertainties associated with fossil fuel supply.

Keywords: Small Modular Reactor (SMR), electric power, fossil energy, petroleum industry, levelized cost of electricity (LCOE), nuclear reactor.

Introducción

Los avances en la tecnología de reactores de fisión nuclear, particularmente en los pequeños reactores modulares (SMR, por sus siglas en inglés), han permitido soportar la demanda de energía eléctrica base, además de ser una fuente de energía eléctrica baja en emisiones que puede suministrar otros productos obtenidos a través de cogeneración, necesarios para descarbonizar sectores tales como transporte, construcción, aplicaciones industriales de calor y desalinización de agua [2]. Los SMR adoptan funciones de seguridad avanzadas y tienen una operatividad mejorada para permitir un funcionamiento flexible con energías renovables variables, tales como la solar y la eólica [2].

La adopción de SMR en sectores industriales complejos, como los campos petroleros, requiere una comprensión profunda de la interacción entre los pequeños reactores modulares y la infraestructura del sistema eléctrico existente. Esto implica no solo una adaptación de los sistemas de distribución eléctrica, sino también una implementación de protocolos avanzados de respuesta a variaciones de carga [3]. Los SMR, en particular aquellos refrigerados por helio, ofrecen una estabilidad termodinámica excepcional que permite una integración eficiente con fuentes intermitentes. La baja reactividad en vacío y los límites térmicos más elevados proporcionan un margen operativo adicional, lo que aumenta significativamente la capacidad de respuesta frente a variaciones de la demanda energética. Fabricantes de reactores como Westinghouse indican que el reactor puede operar con variaciones de hasta el 20 % de la carga en un minuto [4].

A su vez, fabricantes de reactores como Nuscale [4], indican que su módulo tiene la capacidad de variar la potencia del reactor hasta un 40 % por hora, lo que se ajusta a las especificaciones establecidas por el Electric Power Research Institute (EPRI, siglas en inglés), en el documento: “Advanced Light Water Reactor Utility Requirements Document, Revision 13, Tier 2, Chapter 1” [5]. Para responder aún más rápidamente a los cambios súbitos de la demanda de energía, por ejemplo, el pequeño reactor modular del fabricante Nuscale puede reducir rápidamente su producción de energía eléctrica hasta un 10 % por minuto y volver a plena potencia a la misma velocidad gracias al bypass de turbina, que lo hace mucho más rápido que los reactores nucleares convencionales [3].

Sin embargo, estas capacidades de maniobrabilidad deben ser entendidas en el contexto del diseño termohidráulico del SMR. El uso del bypass de turbina permite una rápida desviación del vapor generado al evitar su paso por la turbina, lo cual modifica la carga sin alterar la potencia térmica del reactor de manera inmediata [6]. Este comportamiento está acoplado al sistema de control de barras y al control automático del flujo de refrigerante, cuyo diseño debe evitar oscilaciones termohidráulicas o estrés térmico en componentes críticos. Además, la respuesta transitoria debe ser validada bajo criterios de seguridad como la relación mínima de flujo de calor crítico (Minimum Critical Heat Flux Ratio), que se utiliza en los análisis termohidráulicos de reactores nucleares para verificar que, durante transitorios como pérdida de flujo, cambios de potencia o perturbaciones operativas, el combustible mantenga una refrigeración suficiente [7].

La implementación de SMR en redes energéticas diversificadas con un alto componente de fuentes renovables intermitentes, como la solar y la eólica, requiere considerar la capacidad de los SMR para operar en modo de carga base y de seguimiento de carga [2]. Los diseños de SMR actuales incluyen mecanismos avanzados de seguridad pasiva y redundancia que les permiten ajustar su producción energética para estabilizar redes con altos niveles de penetración de energía renovable. Esto se logra mediante el uso de tecnologías de control de reactividad y almacenamiento térmico integrado, lo que permite que los SMR sirvan como una reserva estratégica que se adapta dinámicamente a la disponibilidad de las fuentes renovables en tiempo real.

Para asegurar el confinamiento de residuos de alta actividad se han desarrollado estrategias avanzadas como el encapsulamiento en matrices cerámicas y el almacenamiento en depósitos profundos. Estas tecnologías ofrecen una solución segura para la disposición de residuos a largo plazo que minimiza el impacto ambiental y el riesgo de exposición radiológica al combustible nuclear usado [2].

Otra de las ventajas de los SMR es su capacidad para ser construidos en plazos más cortos, ocupar menos espacio, operar con mayor seguridad y garantizar una alta disponibilidad de energía. Esto les permite generar energía de manera constante durante todo el año, alcanzando un factor de planta que puede superar el 93 % [8].

La independencia de los SMR de condiciones climáticas adversas, como el fenómeno de El Niño, brinda una estabilidad energética única en su tipo. Este factor resulta esencial en áreas vulnerables a cambios estacionales extremos, pues asegura una capacidad de carga constante y confiable durante todo el año [9].

Esta condición de continuidad del suministro eléctrico de energía, sumada a la disminución del costo nivelado de energía durante la vida útil de la central de generación [10], fue elaborada por la Agencia Internacional de Energía (IEA, siglas en inglés), y la Asociación de Energía Nuclear (NEA, siglas en inglés) perteneciente a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). Según dicha condición, los costos de generación de energía nuclear se estiman entre USD\$52/MWh y USD\$85/MWh, lo que puede apalancar un caso de negocio para proceder con la inversión. Por lo tanto, si se compara el Costo Nivelado de Energía (LCOE, por sus siglas en inglés) de la energía

nuclear con el LCOE de las fuentes fósiles como carbón o gas, e inclusive con el LCOE de otras fuentes bajas en carbono como hidráulica, eólica o solar fotovoltaica, es posible observar una tarifa competitiva para la energía nuclear.

Por otro lado, la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés) y la NEA, perteneciente a la OCDE, han desarrollado una proyección del LCOE para diferentes tecnologías de generación [11]. Dicha proyección muestra que el rango de los costos de generación de energía nuclear, sumado a la capacidad de las centrales nucleares para garantizar un suministro eléctrico continuo a lo largo del año, respalda un caso de negocio viable para la inversión. Además, al comparar el LCOE de la energía nuclear con el de las fuentes fósiles, e incluso con otras fuentes bajas en carbono como la eólica o la solar fotovoltaica, se evidencia que la energía nuclear ofrece una tarifa competitiva en el mercado energético.

2. Procedimiento

Se hizo un análisis del estado del arte con corte a julio de 2024 en SMR, así como una revisión de la regulación en Colombia; posteriormente, se realizó un estudio de prefactibilidad para la implementación segura y pacífica de una central nuclear en Colombia. A continuación, se relaciona la metodología aplicada para el desarrollo de los objetivos:

2.1 Revisión del estado del arte a julio de 2024 en SMR

Revisión de la literatura académica, informes técnicos y estudios de caso existentes sobre SMR.

Identificación de los últimos desarrollos tecnológicos, costos y aplicaciones prácticas de SMR en diferentes contextos a nivel mundial.

Comparación de las características de los SMR con tecnologías de generación fósiles.

2.2 Revisión de la regulación nuclear en Colombia

Estudio y compilación de la normativa y regulaciones nucleares vigentes en Colombia.

Comparación respecto a cómo estas regulaciones se alinean con las directrices internacionales, especialmente las del OIEA.

Identificación de posibles brechas o áreas de mejora en la legislación actual que podrían afectar la implementación de los SMR.

2.3 Identificación de requerimientos de regulación y normativas del OIEA

Revisión y síntesis de los requisitos y normativas del OIEA relevantes para la implementación de los SMR.

Identificación de las necesidades de adaptación o actualización de la regulación local para cumplir con estos estándares internacionales.

2.4 Estudio de prefactibilidad técnica y económica

Estudio de prefactibilidad técnica de la implementación de un SMR en un campo de producción de petróleo, incluyendo aspectos como diseño y capacidad.

Evaluación de la prefactibilidad económica mediante el análisis del costo-beneficio, incluyendo costos de construcción (CAPEX), operación, mantenimiento y desmantelamiento (OPEX) y comparación con la generación usada en el campo petrolero.

Registro de como la implementación de SMR contribuiría a la descarbonización de la matriz energética del campo petrolero.

2.5 Análisis de integración de sistemas para la implementación de SMR

Consulta de los modelos de simulación del fabricante seleccionado aprobados por el regulador para determinar las necesidades de adaptación y la compatibilidad del SMR con los sistemas de distribución eléctrica existentes, con el fin de evitar picos de carga que podrían comprometer su estabilidad.

Identificación de cómo la implementación del SMR puede mejorar la producción de energía del campo petrolero.

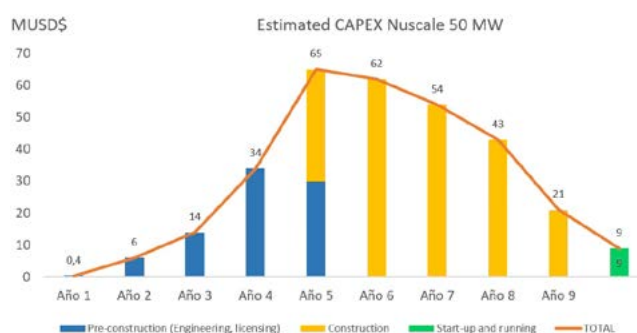
3. Resultados y discusión

El estudio de prefactibilidad para la implementación de SMR en un campo de producción de petróleo combinó un análisis técnico y económico, organizado de la siguiente manera:

1. La prefactibilidad técnica se estimó a partir de la valoración del reactor seleccionado, establecida por la (OCDE/NEA) [11].

2. La prefactibilidad económica permitió cuantificar la inversión inicial de MUSD\$308 y los costos operativos asociados, representados en la figura 1. Este enfoque permitió establecer no solo la adaptabilidad tecnológica a la red eléctrica del campo de petróleo, sino también la sostenibilidad financiera del proyecto, alineándose con los compromisos de descarbonización.

Figura 1. Valoración reactor seleccionado



Como parte del análisis de prefactibilidad, para evaluar el grado de desarrollo de los reactores modulares pequeños (SMR) se usaron las seis condiciones incorporadas en la valoración utilizada por la NEA/OCDE [11]. En primer lugar, permite validar la madurez tecnológica de los SMR con el objetivo de generar confianza en su implementación y en segunda instancia, identificar las barreras técnicas.

3.1 Alineación con directrices OIEA

El análisis del marco normativo nacional en materia nuclear permitió identificar que Colombia posee una arquitectura legal parcialmente alineada con las directrices del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Se evidenciaron avances en aspectos como salvaguardias y responsabilidad civil, enmarcados en compromisos internacionales ratificados por el país, así como lineamientos generales sobre seguridad tecnológica en el contexto de la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Radiológica. No obstante, se identificaron vacíos regulatorios en temas como el licenciamiento específico de reactores modulares, la categorización del material nuclear y la infraestructura institucional para ejercer funciones de regulador independiente. Esta situación plantea la necesidad de desarrollar una hoja de ruta regulatoria que permita el eventual licenciamiento de SMR bajo estándares IAEA Safety Standards Series.

El OIEA recomienda que la legislación nuclear debe disponer el establecimiento de un órgano regulador independiente, dotado de la autoridad y competencia técnica necesaria, así como de recursos humanos y financieros necesarios para ejercer de manera eficaz sus funciones de regulación y control; estos mecanismos sugieren el desarrollo de una ley nuclear, evidenciado en el proyecto de ley 466/2024 aprobado por la Cámara de Representantes y el Senado de la República: "...Por el cual se crea la Agencia Nacional de Seguridad Nuclear - ANSN y se establece el marco legislativo que regula las actividades que involucran el uso de las radiaciones ionizantes, los materiales nucleares y los materiales radiactivos en el territorio nacional [12].

3.2 Valoración de la tecnología nuclear

Concesión de licencias: sigue de cerca las normas internacionales de concesión de licencias, incluidas las interacciones previas a la concesión de licencias con los reguladores, la aprobación del diseño, la construcción y la expedición de licencias de explotación. Se concede una bonificación a los SMR con actividades de concesión de licencias en múltiples jurisdicciones a cualquier nivel.

La concesión de licencias para SMR implica una complejidad adicional, debido a la naturaleza novedosa de su diseño y la falta de precedentes regulatorios en muchas jurisdicciones. Los SMR requieren un marco regulatorio que contemple su operación modular, los sistemas de seguridad pasiva y la posibilidad de configuraciones multi-módulo que interactúan en red. Además, la regulación debe adaptarse a la evaluación de ciclos de vida operacionales más prolongados y a la certificación de procesos de reprocesamiento in situ del combustible, que constituyen aspectos críticos determinantes en la viabilidad económica y operativa de estas tecnologías. La implementación de estos aspectos en el marco normativo es esencial para la aceptación y seguridad de los SMR en la industria energética.

Emplazamiento: Evalúa las decisiones adoptadas por los propietarios de sitios potenciales y considera el grado de preparación de estos para la construcción de reactores SMR. Se concede una bonificación, independiente a su fase de desarrollo, a las tecnologías de SMR que demuestren avances simultáneos en múltiples emplazamientos a cualquier nivel.

Financiación: refleja tanto los anuncios públicos de los diseñadores de reactores, como los informes de financiación de fuentes públicamente disponibles.

Cadena de suministro: considera niveles crecientes de compromiso reflejados en memorandos de entendimiento, contratos vinculantes y asociaciones formales, empresas conjuntas o consorcios con proveedores o empresas de ingeniería, adquisiciones y construcción.

La cadena de suministro para SMR debe ser altamente especializada y contar con capacidades de manufactura de componentes modulares que puedan transportarse e instalarse rápidamente en sitio. Dado que los SMR requieren tolerancias precisas y materiales avanzados capaces de soportar condiciones extremas de operación, la logística debe integrar técnicas de manufactura de alta precisión y sistemas de control de calidad bajo normas internacionales estrictas. La cooperación entre proveedores y el cumplimiento de certificaciones nucleares internacionales son esenciales para asegurar que los módulos cumplen con los criterios de seguridad y desempeño necesarios para la operación continua y segura de los SMR en entornos industriales complejos.

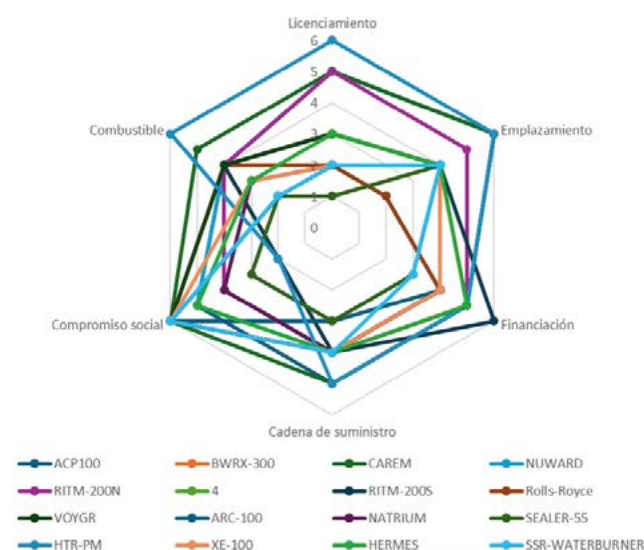
Compromiso: refleja el número de compromisos con las personas y comunidades asociadas al proyecto SMR, evidenciados por memorandos de entendimiento, respaldos, reuniones municipales o acuerdos de reparto de beneficios.

El compromiso comunitario es esencial para la aceptación de los SMR en entornos industriales y urbanos. La implementación de programas de sensibilización y la transparencia en la comunicación de riesgos y beneficios puede mejorar significativamente la percepción pública y el apoyo a largo plazo para proyectos nucleares.

Combustible: se basa en los avances hacia el suministro comercial de combustible cualificado. Una vez que existe una instalación autorizada y operativa para la fabricación de combustible, éste se tiene en cuenta junto con otros que ya se utilizan en centrales en funcionamiento. Para los SMR en este nivel de madurez, las siguientes etapas incluyen contratos para el suministro de combustible y una licencia para operar el reactor con el combustible específico [11].

Se realizó un análisis comparativo de las seis condiciones, según la valoración utilizada por la NEA/OCDE [11], en los modelos SMR con mayor nivel de madurez tecnológica y es presentado en la figura 2 [11].

Figura 2. Comparativo de reactores con mayor madurez tecnológica.
Fuente: Elaboración propia con información de NEA/OCDE [11].



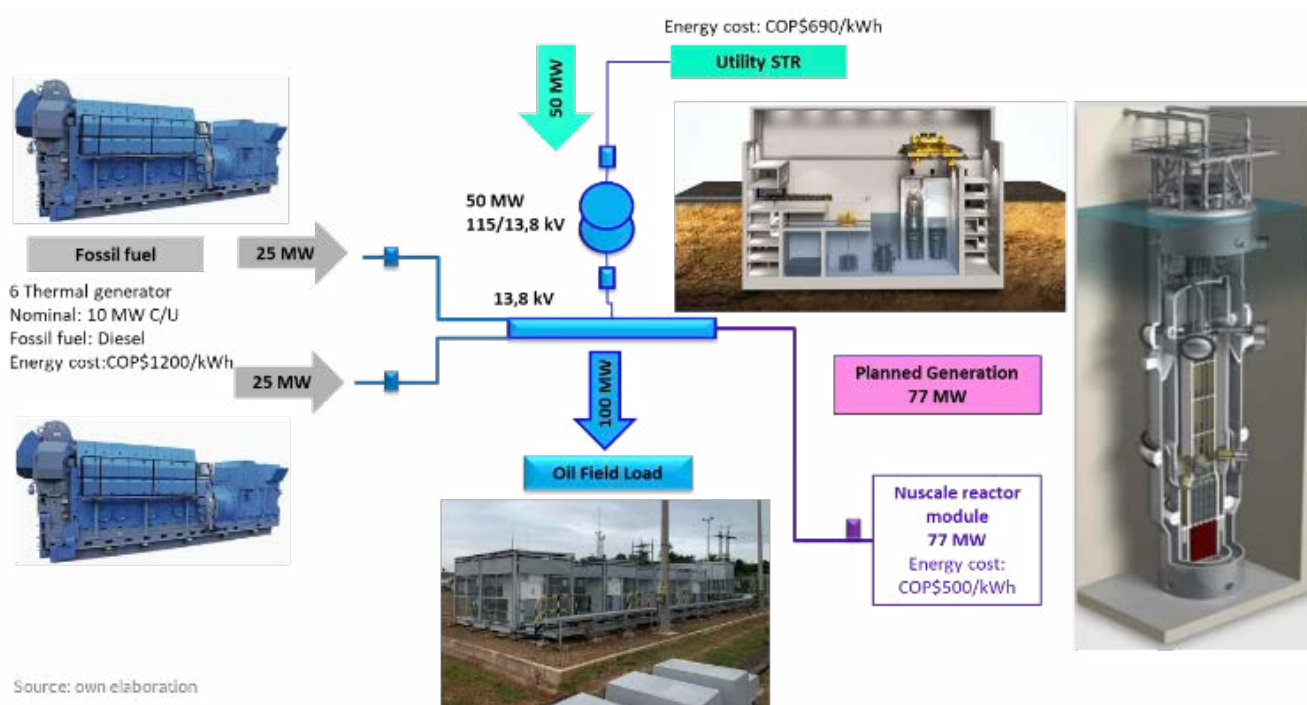
3.3 Reactor seleccionado

Conforme a la valoración realizada en el numeral anterior, se escogió el modelo de reactor VOYGR® de Nuscale [13] para sustituir cincuenta (50) MW de demanda de energía del campo petrolero, atendidos por una fuente fósil.

El campo de producción de petróleo cuenta con 350 pozos productores con sistema de levantamiento artificial a través de bombeo electrosumergible, compuesto por una bomba centrífuga multietapa. Cada etapa contiene un impulsor giratorio y difusores estacionarios, fundidos normalmente en hierro de alto contenido en níquel, para minimizar los daños por abrasión o corrosión. A medida que el fluido del pozo fluye hacia la primera etapa del bombeo electrosumergible, pasa a través de un impulsor y es centrifugado radialmente hacia afuera, por lo que gana energía en forma de velocidad. La bomba centrífuga es accionada por un motor de inducción que puede alcanzar velocidades de funcionamiento de más de 5.000 rpm cuando se controla con un variador de velocidad [14].

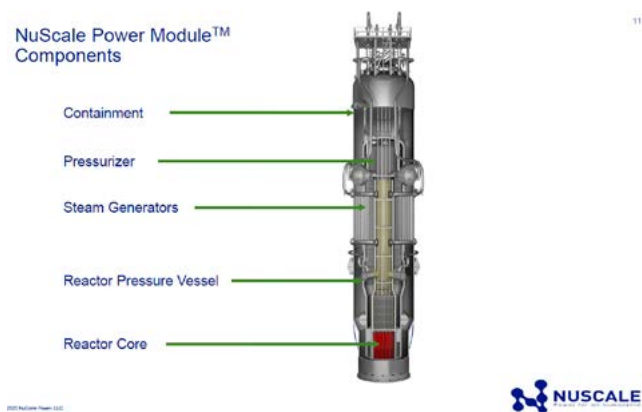
Estos pozos son alimentados a través de una red de media tensión a 13,8 kV, la cual toma su energía de dos fuentes: la primera, desde dos centrales térmicas que suman 50 MW y la segunda, a través de una conexión al Sistema de Transmisión Regional (STR) a nivel de 115 kV de donde se toman otros 50 MW para un total de 100 MW, con la configuración mostrada en la figura 3.

Figura 3. Esquema sistema de generación de energía campo de producción. Fuente Elaboración propia



La elección del reactor VOYGR® responde no solo a sus características de generación continua, sino a su capacidad de modulación en entornos de alta demanda industrial. Este reactor incorpora mecanismos de seguridad pasiva y una integración optimizada de sus módulos, cuya estructura se muestra en la figura 4 [15], lo que le permite alcanzar altos niveles de eficiencia térmica (>30 %) en entornos de operación prolongada.

Figura 4. Partes principales del módulo Nuscale



Se realizó el análisis comparativo de variables asociadas a la generación con combustible fósil (diésel) y la generación con SMR, mostrados en la tabla 1. Se observó que hay una valoración económica negativa para aquellas tecnologías altas en emisiones de CO₂ y su modelo económico se ve castigado con USD\$30/Ton CO₂. Este esquema incentiva el uso de tecnologías bajas en emisiones en los nuevos proyectos y, en el caso de SMR, le da un bono de MUSD\$6,6. También, se observa un ahorro de MUSD\$38/año por diferencia de tarifa de energía y una opción de negocio al facilitar la comercialización del diésel y el petróleo usado para la generación de energía por un valor de venta de MUSD\$18/año. Al sumar estos beneficios se alcanza un ahorro anual de MUSD\$62,65, con un periodo de retorno de la inversión de cinco años.

Tabla 1. Comparativo económico Diesel y SMR.

Variable Evaluada	Primer año Diesel	Primer año SMR
Producción de energía (MWh/año)	435.000	674.520
Emisiones estimadas (TON CO ₂ e/año)	220.752	26.490
Reducción precio sombra (MUSD)	0	\$6,62
Costo nivelado de energía LCOE (USD/MWh)	210	80

Capacidad de Generación Nominal (MWe)	50	77
Factor de planta Nominal	0,86	0,92
Energía Generada (MWh)	376.680	620.558
Costo de Energía Generada (MUSD)	\$91,98	\$53,96
Consumo de crudo (BOPD)	534.725	0
Consumo de fuel Oil #4 (BPD)	49.275	0
Margen de venta de crudo (MUSD/BLS) @30 USD/BL	0	\$16,04
Margen de venta de Fuel Oil #4 (MUSD/BLS) @40 USD/BL	0	\$1,97
Inversión inicial SMR (MUSD)		\$308
Beneficio anual (MUSD)		\$62,65
Retorno de la inversión (años)		4,92

3. Conclusiones

Se puede diversificar la energía usada en el campo de producción petrolera y reemplazar las fuentes fósiles por energía nuclear a través de SMR, puesto que brindan una energía continua y de bajas emisiones, sin tener variabilidad en los precios por fenómenos climáticos como el del Niño. Esto permitiría configurar una matriz eléctrica diversificada y resiliente ante desafíos climáticos y de suministro de combustibles fósiles.

Tras considerar los seis parámetros de la NEA/OCDE, se seleccionó el módulo VOYGR® de Nuscale, de 77 MWe, ya que se observó un tiempo de respuesta rápido del apagado seguro del reactor ante los eventos y perturbaciones presentados en las simulaciones; esto indica que el sistema de control del reactor seleccionado es robusto y brinda seguridad en las respuestas a las contingencias evaluadas.

En el análisis realizado se observan beneficios anuales por MUSD\$62,6, que apalancan la inversión y permiten recuperarla en un tiempo menor a 5 años, lo que confirma lo visto en el marco teórico. Se requerirá ajustar gradualmente el modelo financiero conforme se despliegan los resultados de la puesta en operación de los SMR que ya iniciaron su construcción, así como una mejora en los esquemas de financiamiento.

La articulación gobierno – empresa – academia es importante, pues se requerirán esfuerzos para la formalización de carreras asociadas a las tecnologías nucleares. Se recomienda hacer alianzas con países cuyo desarrollo nuclear sea significativo (Argentina, Estados Unidos, Canadá, Francia, Rusia, Corea, China, entre otros), y establecer a su

vez el mantenimiento de empleos especializados y mejor remunerados.

En el mundo hay 32 países que usan energía nuclear y planean seguir usándola para generar energía eléctrica; se sumarán 10 países que planean construir SMR. Se observó claramente un resurgimiento de la energía nuclear, con corte a julio de 2024 [16].

Los diseños de SMR usan menos combustible dado que aumentan la frecuencia de reposición del energético, lo que mejora los costos de operación; esto genera menos residuos y permite el menor uso de tierra en comparación con otras fuentes de energía.

Se observan resultados del esfuerzo por parte del Ministerio de Minas y Energía en relación con la actualización de la normativa asociada a las tecnologías nucleares, por ejemplo, la Resolución 40234 del 4 julio de 2024: “Por la cual se establecen los requisitos para la seguridad física en el empleo de fuentes radiactivas de categoría 1, 2 y 3...”, y la Resolución 40306 del 5 de agosto 2024, “Por medio del cual se actualiza el reglamento para el transporte seguro de materiales radiactivos”, que demuestran un claro compromiso por parte del Ministerio de Minas y Energía en actualizar su normativa en asuntos nucleares, en la búsqueda de alinear la regulación nacional con los lineamientos y directrices del OIEA.

Se aconseja continuar con la vigilancia tecnológica para que se desarrolle el estudio de factibilidad y los estudios asociados a la aproximación por hitos, sugeridos por el OIEA, para cualquier estado miembro en el despliegue de un programa nuclear.

Referencias

- [1] Llanes Hermes, Perez Alison, «Prefactibilidad de implementación de un pequeño reactor modular para generación de energía eléctrica en un campo petrolero», 2025. Disponible en: <https://repository.urosario.edu.co/handle/10336/46568>
- [2] Emma Midgley, “Descarbonizar las industrias con la ayuda de microrreactores y reactores nucleares pequeños”, Boletín del OIEA, pp. 12–13, septiembre de 2023. . Disponible en: <https://www.iaea.org/sites/default/files/23-03627sweb.pdf>
- [3] NuScale Nonproprietary, “NuScale SMR Technology. An ideal solution for repurposing U.S. coal plant infrastructure and revitalizing communities”, NuScale Power, LLCc, 2021. Disponible en: <https://www.nuscalepower.com/hubfs/Website/Files/Technical%20Publications/nuscale-smr-technology-an-ideal-solution-for-coal-plant-replacement.pdf>
- [4] Westinghouse Electric Company LLC, «Delivering on the Promise of Small Modular Reactors», presentado en Delivering on the Promise of Small Modular Reactors, Viena, Austria, 2024
- [5] L. Loflin, B. McRimmon, y S. Swilley, “Advanced Nuclear Technology: Advanced Light Water Reactors Utility Requirements Document Small Modular Reactors Inclusion Summary”, Electric Power Research Institute, 3002003130, nov. 2014. Disponible en: <https://www.energy.gov/ne/articles/advanced-nuclear-technology-advanced-light-water-reactors-utility-requirements-document>
- [6] A. Rusanov, A. Kostikov, V. Tarasova, P. Русанов, y S. Tretiak, “The concept of creating a maneuverable power plant based on a small modular reactor”, Nauk. Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, núm. 5, 2024. Disponible en: <https://nvngu.in.ua/index.php/en/archive/on-the-issues/1913-2024/content-5-2024/7020-37>
- [7] R. Lo Frano, G. Forasassi, A. Poggianti, y M. Forni, “Seismic Safety Margin of an Isolated SMR Reactor Under Severe Earthquake”, en Small Modular Reactors Symposium, feb. 2012. Disponible en: 10.1115/SMR2011-6578
- [8] Office of Nuclear Energy, US Department of Energy [GovNuclear], “More than 93 % of the time, nuclear works ALL the time to bring you clean and reliable power”. Disponible en: <https://x.com/GovNuclear/status/1815121844124402140>
- [9] Prieto Valderrama C and Patiño D (2025) Modeling the transition from coal to SMRs in Colombia: emissions

avoidance under deterministic and probabilistic frameworks. *Front. Energy Res.* 13:1618696. doi: 10.3389/fenrg.2025.1618696

- [10] International Energy Agency, “Projected Costs of Generating Electricity 2020”, Nuclear Energy Agency, France, dic. 2020. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2020>
- [11] OCDE, “The NEA Small Modular Reactor Dashboard: Second Edition”, OCDE; Nuclear Energy Agency, NEA No. 7671, mar. 2024. Disponible en: https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_90816/the-nea-small-modular-reactor-dashboard-second-edition?details=true
- [12] J. F. Cristo Bustos, “Proyecto de ley Nuclear. Por el cual se crea la Agencia Nacional de Seguridad Nuclear - ANSN y se establece el marco legislativo que regula las actividades que involucran el uso de las radiaciones ionizantes, los materiales nucleares y los materiales radiactivos en el territorio nacional”, Gaceta N 068 de 2025. Disponible en: <https://www.camara.gov.co/ley-nuclear>
- [13] Scott Burnell y Nuclear Regulatory Commission, “NRC Approves Standard Design for NuScale US460 Small Modular Reactor. Disponible en: <https://www.nrc.gov/cdn/doc-collection-news/2025/25-033.pdf>
- [14] R. von Flatern, “The Defining Series: Electrical Submersible Pumps”, Oilfield Review, 2015. Disponible en: <https://www.slb.com/resource-library/oilfield-review/defining-series/defining-esp>
- [15] D. Claudio, “NuScale Power Overview – Energiforsk Nuclear Seminar 2021”, Nuscale, ene. 2021. Disponible en: https://energiforsk.se/media/29017/claudio_nuscale.pdf
- [16] International Atomic Energy Agency, “Nuclear Technology Review 2024”, GC (68)/INF/4, sep. 2024. Disponible en: <https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc68-inf-4.pdf>