

¹ Independiente, Jr. Juan Pablo II 265, Cajamarca, Perú (brian.d.pajares@gmail.com, +51 988808110)

² Independiente, Calle 14 225, Lima, Perú (y.ramirezcandiotti@gmail.com, +51 994560832)

³ Independiente, dirección, Lima, Perú (maria.taipe@tecsup.edu.pe y 9+51/54 025 251)

RESUMEN

El estudio demuestra que la integración de reactores modulares pequeños (SMR) de 100 MWe, combinados con parques solar-fotovoltaicos y eólicos respaldados por sistemas BESS de 50 MW/200 MWh, constituye la estrategia óptima para abastecer en forma firme, competitiva y baja en carbono a las minas cupríferas peruanas situadas por encima de los 3 800 m s.n.m. La metodología parte de la construcción de perfiles horarios representativos de demanda para Quellaveco, Las Bambas y Antapaccay, los cuales se someten a optimización MINLP en HOMER Pro y a simulaciones de sensibilidad Monte-Carlo variando WACC (6-12 %), penetración renovable (15-45 %) y CAPEX (± 20 %). Se comparan tres escenarios: (A) diésel/red, con un LCOE de 80-120 USD/MWh y máxima huella de carbono; (B) SMR puro, que desciende a 50-70 USD/MWh y reduce 55 % de las emisiones; y (C) el sistema híbrido SMR + 35 % renovables, que logra 45-65 USD/MWh, recorta hasta 70 % de CO₂ y disminuye 18 000 viajes cisterna anuales, mejorando la confiabilidad a un LOLP de 0,002 h/año y reduciendo el tiempo de black-start de 6 h a 43 min. Sólo en Las Bambas, el cambio del escenario A al C ahorra 59,6 M USD al año y evita cerca de 0,97 Mt CO₂ anuales. Los SMR, fabricados en serie y transportables por carretera, se despliegan modularmente, evitando sobredimensionamiento y mitigando riesgos financieros, mientras su diseño de seguridad pasiva garantiza operación autónoma en entornos andinos. Para viabilizar

la adopción se propone un Reglamento de Reactores de Potencia ≤ 300 MWe, un modelo de financiamiento BOOT respaldado por bonos verdes y un programa de diálogo comunitario que refuerza la licencia social; con ello, la solución posiciona al cobre peruano como insumo “net-zero”, genera primas ESG superiores a 5 USD/t y contribuiría con hasta un 6 % a la meta nacional de reducción de gases de efecto invernadero al 2030, consolidando la competitividad y sostenibilidad de la gran minería del país.

Preguntar a ChatGPT

Palabras Clave: Energía Nuclear, SMR (Reactores Modulares Pequeños), Energías Renovables, Minería Remota, Costos de Producción, Reducción de CO₂

1. Introducción

En 2024, el Perú se consolidó como el **segundo productor mundial de cobre**, con un volumen > 2,3 Mt que aportó casi **30 % del valor total de las exportaciones nacionales** (ComexPerú, 2024). Este liderazgo se sustenta en mega-yacimientos de alta ley situados en la Cordillera de los Andes—generalmente a más de 3 800 m s.n.m.—cuyos procesos de perforación, voladura, chancado, molienda y bombeo demandan **intensidades energéticas que superan los 100 kWh/t de mineral**. Tal consumo aumenta de modo no lineal cuando la operación se ubica en regiones remotas, debido a pérdidas en líneas de transmisión, uso de diésel para

generación in situ y la logística de transporte de combustibles a través de rutas de difícil acceso.

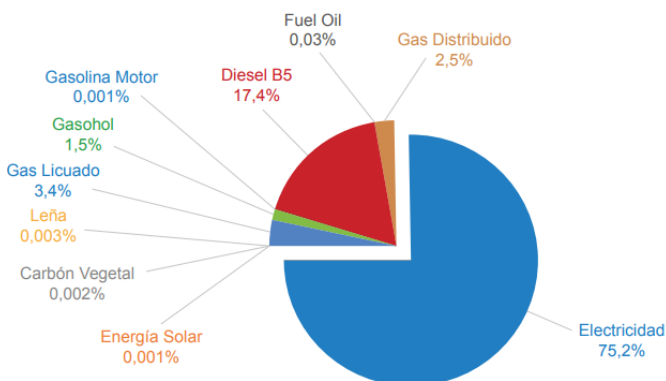
En el marco de la **transición energética global y los compromisos climáticos firmados en la COP28**, la industria minera peruana se enfrenta a un doble reto: **garantizar un suministro eléctrico confiable que sustente la expansión de la producción**—proyectada a 3 Mt de cobre fino para 2030—y, simultáneamente, **reducir su huella de carbono para preservar la competitividad** en mercados que penalizan la intensidad de emisiones mediante mecanismos como el CBAM europeo. El inventario energético actual del sector muestra una **dependencia del 75,2 % de la electricidad de la red** y un **17,4 % de Diésel B5** (MINSUS, 2021); la proporción restante incluye gas natural y combustibles secundarios. Este mix implica un factor de emisión promedio de 0,35 kg CO₂/kWh, muy por encima de los umbrales exigidos por clientes downstream (automotrices, fabricantes de cables y electrónica) que buscan material “net-zero”.

Son particularmente ilustrativos los casos de **Las Bambas (MMG) y Antapaccay (Glencore)**, cuyas demandas combinadas—≈300 MW continuos, equivalentes al 5,4 % del consumo energético minero nacional—se satisfacen hoy mediante contratos PPA con la red interconectada y grupos electrógenos diésel de respaldo. La distancia media a los centros de generación (≥ 700 km) implica pérdidas técnicas del 7 % y sobrecostos logísticos que encarecen el kWh hasta 0,12 USD en punta, además de más de **1 Mt CO₂/año** en emisiones combinadas. Con la entrada en vigencia de regulaciones ESG más estrictas y de impuestos al carbono implícitos, **el costo de oportunidad de continuar con este modelo fósil se vuelve prohibitivo**.

Frente a este panorama, la convergencia de tres factores—**maduración tecnológica de los Reactores Modulares Pequeños (SMR)**, caída estructural del CAPEX de **energía solar-fotovoltaica y eólica de altura**, y avances en **BEES de ion-litio de larga duración**—abre una ventana estratégica: **desplegar microrredes de potencia firme respaldadas por energía nuclear modular y renovables** directamente en el distrito minero. Esta arquitectura promete no solo reducir costos y emisiones, sino también **fortalecer la seguridad energética**, mitigar riesgos de interrupciones en la red nacional y crear un nuevo polo de desarrollo tecnológico-industrial en la sierra peruana. El presente trabajo profundiza esta

oportunidad: establece la base de datos, la metodología de simulación y los criterios de evaluación que permiten demostrar la viabilidad integral del sistema híbrido SMR + Renovables como motor de la próxima revolución energética minera en el Perú.

Figura 1. Participación de fuentes de energía en el consumo final del sector minero.



Fuente: Balance Nacional Energético, Ministerio de Energía y Minas, Publicación 2019.

En este contexto, empresas como las antes mencionadas, están apostando por transicionar a fuentes de energías renovables. Un ejemplo notable es Quellaveco de la compañía Anglo-American abastecida por el mayor parque de molinos de viento del país (Forbes Perú, 2023).

Por otro lado, existe una actividad significativa en la comercialización de tecnología SMR, subconjunto de reactores con una potencia de salida reducida en comparación a los convencionales, pero que ofrecen una alternativa de energía continua y de bajo impacto. Esto ha llamado la atención del sector minero, cuya implementación híbrida con otras fuentes de energía renovables permitirían aumentar su producción y disminuir y avanzar en el proceso de descarbonización (NEA, 2024)

2. Objetivos

El presente trabajo tiene como finalidad principal evaluar el potencial técnico, económico y ambiental del uso de los SMR en operaciones

mineras peruanas. Para lograrlo se plantean los siguientes objetivos:

- **Cuantificar la factibilidad técnica** de la implementación de SMR en conjunto con energías renovables para suministrar la demanda energética de grandes operaciones cupríferas peruanas ubicadas en zonas remotas.
- Determinar el **Costo Nivelado de Energía (LCOE)** bajo distintos escenarios (base diésel, red eléctrica convencional, solar+SMR, eólica+SMR).
- Estimar la **reducción de emisiones de CO₂** frente al uso de combustibles fósiles en la generación eléctrica requerida por minas remotas. Caso de estudio Quellaveco.
- **Proponer lineamientos regulatorios** que faciliten la adopción de SMR y renovables, garantizando seguridad, competitividad y sostenibilidad.

3. Compilación de Datos y Desarrollo del Trabajo

3.1 Consumo eléctrico promedio en minas de cobre

Las operaciones mineras como Quellaveco, Las Bambas y Antapaccay presentan demandas energéticas significativas. Por ejemplo:

- Quellaveco proyectó una demanda de 163 MW en 2024, con estimaciones actuales que alcanzan entre 200 y 300 MW para 2025 (Ministerio de Energía y Minas, 2024).
- Las Bambas, por su parte, opera con una demanda estimada de 200 MW y un factor de carga del 85%, lo que representa un consumo anual de aproximadamente 1,490 GWh (SNC-Lavalin Perú, 2016).
- Antapaccay, similar a Las Bambas, opera con una demanda de 180 - 200 MW

aproximadamente, con una dependencia significativa de diésel durante contingencias. (Rumbo Minero, 2022)

Estas cifras reflejan la necesidad de soluciones energéticas robustas, sostenibles y adaptadas a zonas remotas, donde el acceso a la red eléctrica es limitado y el uso de diésel implica altos costos logísticos y ambientales (Ministerio de Energía y Minas, 2024).

3.2. Integración de SMR con Energías Renovables en Entornos Mineros

La integración de reactores modulares pequeños (SMR) son fuentes de energía renovable y representa una solución energética híbrida atractiva para operaciones mineras en zonas remotas. Esta combinación permite aprovechar la estabilidad y continuidad del suministro nuclear con la variabilidad y bajo costo operativo de tecnologías como la solar fotovoltaica y la eólica.

Según la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA, 2025), los SMR están diseñados para operar de forma flexible, lo que los hace compatibles con sistemas híbridos que incluyen energías renovables. Esta sinergia permite reducir la dependencia de combustibles fósiles, mejorar la resiliencia energética y disminuir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, su capacidad de operar en modo de carga base complementa perfectamente la intermitencia de las renovables, garantizando un suministro continuo incluso en condiciones climáticas adversas.

A nivel internacional, existen propuestas y estudios que respaldan esta integración. Por ejemplo, en regiones como Canadá, Rusia y China, se están desarrollando proyectos piloto donde los SMR se combinan con renovables para abastecer comunidades aisladas, instalaciones industriales y operaciones mineras (IAEA, 2025; IEEE Spectrum, 2025). Estos modelos demuestran que la tecnología no solo es viable, sino que puede ser replicable en contextos como el peruano, donde la minería opera en zonas de difícil acceso y con alta demanda energética.

En este contexto, la adopción de sistemas híbridos SMR más renovables no solo representa una alternativa técnica y ambientalmente sólida, sino

también una estrategia de independencia energética.

3.3. Selección de Tecnologías SMR y Capacidades de Diseño

Los Small Modular Reactors (SMR) son reactores nucleares avanzados con una capacidad de generación eléctrica de hasta 300 MWe por módulo, diseñados para ser fabricados en serie y ensamblados en sitio. Esta categoría incluye una variedad de tecnologías, como reactores de agua a presión (PWR), reactores de sales fundidas (MSR), reactores rápidos refrigerados por gas o metal, y reactores de alta temperatura moderados por grafito (World Nuclear Association, 2025a). La clasificación general de los reactores nucleares según su capacidad es la siguiente:

Microreactores: menos de 10 MWe, diseñados para aplicaciones muy remotas o móviles.

SMR (Small Modular Reactors): entre 10 y 300 MWe, ideales para zonas aisladas o con redes eléctricas limitadas.

MSR (Medium-Sized Reactors): entre 300 y 700 MWe, utilizados en redes medianas o como respaldo de grandes sistemas.

LR (Large Reactors): más de 800 MWe, típicamente usados en centrales nucleares tradicionales para abastecer grandes ciudades o industrias (World Nuclear Association, 2025b).

La elección de un SMR frente a un reactor convencional se justifica por su diseño compacto y modular, que facilita el transporte por carretera o ferrocarril hacia zonas remotas, como las que suelen ocupar las operaciones mineras. Esta característica permite una logística más eficiente y adaptable. Además, los SMR reducen significativamente los tiempos de construcción, ya que la mayoría de sus componentes se fabrican en planta y se ensamblan directamente en el sitio de operación. En términos de seguridad, incorporan sistemas pasivos que no requieren intervención humana inmediata ante fallos, lo que disminuye los riesgos operativos. Finalmente, su escalabilidad permite instalar múltiples módulos de forma progresiva, ajustándose a la evolución de la demanda energética de la operación minera (IAEA, 2025).

Además, los SMR presentan ventajas económicas al reducir el riesgo financiero asociado a megaproyectos nucleares, ya que pueden

implementarse por fases. Esto es especialmente relevante para operaciones mineras que buscan independencia energética sin comprometer su flujo de caja

Para este estudio se consideró como referencia el **diseño de un SMR de ~100 MWe** por módulo, con un factor de capacidad del 90%. Un módulo de este tipo puede llegar a producir cerca de **788,400 MWh/año** ($100 \text{ MW} * 24 \text{ h/d} * 365 \text{ días} * 0,90$). En caso de requerirse mayor capacidad, se contempló la opción de multiplicar el número de módulos (p.e. 2 o 3 módulos).

3.4. Cálculo de LCOE en Diferentes Escenarios

El Costo Nivelado de Energía (LCOE) es una métrica estandarizada que permite comparar el costo total de generación eléctrica entre distintas tecnologías. Este indicador considera la inversión inicial, costos de operación, mantenimiento, combustible (si aplica) y la vida útil del sistema (IRENA, 2024).

Se compararon tres escenarios energéticos aplicables a operaciones mineras:

Escenario A (Diésel/Red Convencional): Este modelo tradicional presenta un LCOE entre 80 y 120 USD/MWh, afectado por los altos costos de transporte de combustible y operación. Aunque es ampliamente utilizado, sufre de volatilidad de precios y genera elevadas emisiones de CO₂, lo que compromete su sostenibilidad a largo plazo (IRENA, 2024).

Escenario B (SMR Puro): El uso exclusivo de reactores modulares pequeños (SMR) ofrece un LCOE estimado entre 50 a 70 USD/MWh, dependiendo del diseño, número de módulos y condiciones de financiamiento. Los SMR proporcionan energía continua, confiable y con baja huella de carbono. Si bien requieren una inversión inicial significativa, sus costos operativos son estables y su vida útil extensa (IAEA, 2025).

Escenario C (SMR + Solar/Eólica): La integración de SMR con fuentes renovables permite alcanzar un LCOE entre 45 a 65 USD/MWh. Aunque implica

mayores costos iniciales por la incorporación de tecnologías múltiples, ofrece importantes ahorros a largo plazo, una mayor estabilidad operativa frente a variaciones energéticas y una reducción significativa de emisiones (World Nuclear Association, 2025; IRENA, 2024).

3.5. Estimación de Reducción de Emisiones de CO₂

El uso de SMR y renovables se justifica con factores técnico, económicos, logísticos y medioambientales, su implementación puede reducir significativamente las emisiones de CO₂ a causa del uso de diésel que además genera altos costos de transporte hacia las zonas remotas y de difícil acceso donde se encuentra la mayoría de mineras, lo que puede llegar a representar entre el 40% a 60% del costo total de suministro de energía. (Allen, M. 2021). Un solo SMR de 100 MW generando 788,400 MWh/año podría desplazar hasta 552,000 toneladas de CO₂ anuales (0,70 kg/kWh * 788,400,000 kWh). Si se integran energías renovables, la cifra asciende, pues la participación fósil disminuye aún más.

Para este estudio se está considerando un factor de emisión promedio de 0,70 kg CO₂/kWh para generación con diésel en altura (Perú Petro. 2023), factor que es ampliamente superado en muchos casos e impacta directamente en costos asociados a impuestos ambientales y reputación de la empresa (IEA, 2022). Por otro lado, el factor de emisión para los SMR.

Caso Práctico: Las Bambas

Unidad minera de cobre a tajo abierto ubicada en la región de Apurímac a una altitud de 3800 y 4600 m.s.n.m. aproximadamente a 75 km de la ciudad del Cusco (Bedón, C. 2016). Para este caso se consideró los siguientes datos obtenidos del Análisis del Potencial y Eventuales usos que tienen las Fuentes de Energías Alternativas en la Minería Peruana (2020), donde se tiene una demanda estimada de ~200 MW al año, con un factor de carga al 85% la demanda de energía es de 1,490,400 MWh/año. Con los datos presentados anteriormente se planteó una comparativa

económica y ambiental entre el escenario actual y el de implementación de SMR y energías renovables (Tabla 1).

	Escenario Actual (Diésel + Red)	Escenario SMR + Renovables
Demanda Energética (MWh)	1,490,400	
Costo (USD/MWh)	100	60
Costo Anual (USD)	149 millones	89.4 millones
Factor de emisión (kg/kWh)	0.70	0.05
Emisiones (CO₂/año)	1,043,280 t	74,520 t

Tabla 1. Comparación económica y de emisión de CO₂ en el escenario actual y con SMR

La implementación de SMRs en zonas mineras resulta en un ahorro económico de cerca de ~59.6 millones USD/año, además de ser una alternativa ambiental, donde, frente al actual consumo de diésel se tiene una reducción de emisiones de ~968,760 t CO₂ al año, presentándose como una solución innovadora al actual modelo energético en el sector minero.

3.6. Escalabilidad y Modularidad de los SMR

Una de las principales ventajas de los reactores modulares pequeños (SMR) es su capacidad de escalabilidad progresiva, lo que permite adaptar la generación eléctrica a la evaluación de la demanda energética de una operación minera. A diferencia de los reactores convencionales, que requieren grandes inversiones iniciales y largos plazos de construcción, los SMR pueden instalarse por módulos, facilitando la planificación por etapas (World Nuclear Association, 2025).

Esta modularidad también permite una fabricación en serie de los SMR, lo que reduce los tiempos de implementación y mejora el control de calidad. Su

diseño compacto facilita el transporte a zonas remotas, haciendo ideales para operaciones mineras fuera del alcance de redes eléctricas. En Canadá, por ejemplo, se han identificado más de 20 minas fuera de red, con Diavik, Raglan y Meadowbank, que podrían beneficiarse de esta tecnología, lo que demuestra la aplicabilidad en contextos similares al de minas peruanas como las Bambas, Antapaccay o Quellaveco (Natural Resources Canada, 2022).

3.7. Viabilidad Regulatoria y Social

La implementación de SMR en el sector minero no solo requiere viabilidad técnica y económica, sino también un entorno regulatorio adecuado y aceptación social. Según el informe del grupo CORDEL de la World Nuclear Association, es necesario establecer procesos de licenciamiento adaptados a las características modulares y escalables de estos reactores. (World Nuclear Association, 2015).

En el caso peruano, esto implicaría la necesidad de una autoridad reguladora o ampliación de competencias del Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), con apoyo técnico internacional. Además, se deben considerar aspectos como la gestión de residuos, la capacitación de personal y la coordinación con organismos internacionales como la IAEA.

Por otro lado, desde el punto de vista social, la aceptación del componente nuclear es clave. La experiencia internacional muestra que el acompañamiento temprano a comunidades locales, la transparencia en la comunicación de riesgos y beneficios son factores determinantes para lograr legitimidad social. En países como Canadá y Finlandia, se han desarrollado estrategias de diálogo comunitario exitosas en torno a proyectos nucleares, que podrían servir de referencia para el contexto minero peruano.

Finalmente, el acceso a financiamiento verde será crucial para viabilizar estos proyectos. Organismos multilaterales como el Banco Mundial, el BID o el Fondo Verde para el Clima ya están evaluando

incluir tecnologías nucleares avanzadas dentro de sus líneas de financiamiento climático, especialmente cuando se integran con energías renovables y contribuyen a la descarbonización industrial (Sandia National Laboratories, 2025).

3.8. Seguridad Operativa y Gestión de Riesgos

Los SMR incorporan sistemas de seguridad pasiva, diseñados para responder automáticamente ante fallos sin necesidad de intervención humana inmediata. Esto es especialmente relevante en entornos mineros remotos, donde la capacidad de respuesta puede estar limitada. Estos sistemas incluyen mecanismos de apagado automático, disipación de calor sin energía externa y contención reforzada ante eventos extremos. Además, los SMR presentan menores riesgos de proliferación y accidentes severos gracias a su menor inventario de combustible y a su diseño simplificado (Sandia National Laboratories, 2021).

4. Presentación y discusión de resultados

4.1. Evaluación Técnica y Económica de Escenarios Energéticos

Ahorro Económico: La combinación de SMR con energías renovables permite reducir el Costo Nivelado de Energía (LCOE) hasta en un 30% respecto al uso de diésel, especialmente en zonas remotas donde los costos logísticos son elevados. En el caso de Las Bambas, esta transición podría representar un ahorro anual de aproximadamente 59 millones de USD, al pasar de un LCOE de 100 USD/MWh (diésel) a uno de 60 USD/MWh (SMR + renovables). Este tipo de ahorro ha sido respaldado por estudios de viabilidad económica en proyectos piloto de SMR en Canadá y EE. UU., donde se destaca la competitividad de esta tecnología frente a fuentes fósiles tradicionales (IEEE Spectrum, 2025).

Reducción Masiva de Emisiones: Aunque el Perú cuenta con una matriz energética mayoritariamente hidroeléctrica, muchas operaciones mineras ubicadas en zonas remotas aún dependen de

fuentes fósiles como el diésel y el gas natural, debido a su desconexión del SEIN.

En este contexto, la implementación de SMR combinados con renovables permitiría reducir las emisiones de CO₂ en más del 70%, al reemplazar tecnologías térmicas por soluciones limpias y continuas. En el caso de Las Bambas, esto equivale a evitar la emisión de aproximadamente 968 mil toneladas de CO₂ al año, contribuyendo a la descarbonización del cobre peruano y mejorando su competitividad en mercados internacionales que exigen trazabilidad ambiental (COES, 2025; World Nuclear Association, 2025).

Base Energética Robusta: Los SMR actúan como fuente firme de energía, lo que permite compensar la intermitencia de fuentes renovables como la solar y la eólica. Esta característica es clave para garantizar la continuidad operativa de las minas, especialmente en zonas alejadas de la red eléctrica nacional. A diferencia de los sistemas 100% renovables, que requieren almacenamiento costoso o respaldo fósil, los SMR aseguran un suministro constante sin depender de condiciones climáticas.

Marco Regulatorio e Institucional: La adopción de SMR requiere marcos específicos de licenciamiento, supervisión de la autoridad nuclear peruana y programas de financiamiento verde. Las simulaciones señalan un alto potencial de implementación si se establece un marco institucional y legal adaptado a esta tecnología.

4.2. Comparación Internacional de Casos de Uso de SMR en Minería o Zonas Remotas

La viabilidad del uso de SMR en minería no es solo una propuesta teórica, sino una tendencia que ya está siendo explorada en diversos países. En Canadá, el gobierno federal ha identificado más de 20 minas fuera de red que podrían beneficiarse de SMR, y se han iniciado proyectos piloto en regiones como Ontario y Saskatchewan (Natural Resources Canada, 2022). En Rusia, el reactor flotante Akademik Lomonosov abastece comunidades remotas en Siberia, demostrando la capacidad de los SMR para operar en condiciones extremas. Por

su parte, Australia ha evaluado el uso de SMR en minería de uranio y cobre en zonas desérticas, donde el acceso a la red es limitado y la demanda energética es constante. Estos casos refuerzan la aplicabilidad de esta tecnología en contextos similares al peruano, donde la minería opera en zonas aisladas con alta demanda energética.

4.2. Impacto en la Competitividad del Cobre Peruano

La adopción de los SMR y las energías renovables no solo permite reducir costos operativos y emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también mejora significativamente la trazabilidad ambiental del cobre producido en el Perú. Este aspecto es crucial, considerando que el cobre es el principal mineral de exportación del país. De acuerdo con el Ministerio de Energía y Minas (2025), durante el primer trimestre del año, el cobre generó ingresos por US\$ 6,540 millones, representando el 31.5% del total de exportaciones mineras, superando ampliamente a otros minerales como el oro y el zinc (Boletín Estadístico Minero – Primer Trimestre 2025, MINEM).

En mercados exigentes como la Unión Europea, Estados Unidos y Asia, los compradores demandan cada vez más materias primas con baja huella de carbono. En este contexto, la certificación de “cobre verde” puede abrir nuevas oportunidades comerciales, mejorar el posicionamiento internacional del Perú como productor responsable y atraer inversiones sostenibles. Además, mecanismos regulatorios como el Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) de la Unión Europea podrían imponer aranceles adicionales a productos con alta intensidad de carbono, lo que hace urgente la transición energética en el sector minero para mantener la competitividad del cobre peruano en el mercado global.

4.3. Contribución de la Minería a los Compromisos Climáticos del Perú

La transición energética en el sector minero, mediante la adopción de tecnologías como los SMR y las energías renovables, representa una oportunidad estratégica para que el Perú avance en el cumplimiento de sus compromisos climáticos internacionales. Según la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) actualizada en 2021, el país se ha comprometido a reducir sus

emisiones de gases de efecto invernadero en un 40% al 2030, de los cuales un 30% es incondicional y un 10% depende de cooperación internacional (MINAM, 2021). La minería, al ser uno de los sectores con mayor consumo energético especialmente en zonas fuera del SEIN que dependen del diésel, tiene un rol clave en alcanzar esta meta.

La implementación de soluciones energéticas limpias en operaciones como Las Bambas, Antamina o Quellaveco no solo reduciría significativamente las emisiones del sector, sino que también permitiría a las empresas mineras alinearse con estándares internacionales de sostenibilidad. Esto es especialmente relevante en un contexto donde los inversionistas y compradores globales priorizan cadenas de suministro con baja huella de carbono.

Además, esta transición posiciona a la minería peruana como un actor activo en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente el ODS 7 (energía asequible y no contaminante), el ODS 9 (industria, innovación e infraestructura) y el ODS 13 (acción por el clima). La “Hoja de Ruta de Sostenibilidad para el Sector Minería Metálica” elaborada por Perú Sostenible destaca que la adopción de tecnologías limpias es clave para cerrar brechas sociales y ambientales en zonas mineras (Perú Sostenible, 2024).

5. Conclusiones

La combinación de reactores modulares pequeños (SMR) con energías renovables se presenta como una alternativa energética técnicamente viable y económicamente competitiva para operaciones mineras en zonas remotas del Perú. Los análisis realizados muestran que esta solución híbrida permite reducir significativamente los costos energéticos y las emisiones de gases de efecto invernadero, mejorando la eficiencia operativa y la sostenibilidad ambiental del sector.

Para viabilizar esta transición, es indispensable el desarrollo de un marco regulatorio específico que contemple el licenciamiento nuclear, la integración con fuentes renovables y mecanismos de financiamiento verde. La implementación de proyectos piloto en colaboración con el sector privado permitiría validar la tecnología en

condiciones reales, garantizando la seguridad operativa y generando confianza institucional.

El diseño modular de los SMR permite una implementación escalonada, ajustada a la demanda energética de cada operación minera. Esta flexibilidad evita el sobredimensionamiento de la infraestructura, reduce riesgos financieros y facilita una transición energética progresiva, especialmente en contextos geográficos complejos como los Andes peruanos.

La adopción temprana de estas tecnologías posicionaría al cobre peruano como un producto de baja huella de carbono, alineado con las exigencias de trazabilidad ambiental de los mercados internacionales. Esto no solo mejoraría el acceso a mercados premium, sino que también fortalecería la imagen del Perú como productor responsable y sostenible.

Finalmente, la transición energética en la minería contribuiría directamente al cumplimiento de los compromisos climáticos del país, como la reducción del 40% de emisiones al 2030 establecida en las NDC, y a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

6. Referencias bibliográficas

COMEX. 2024. Producción cuprífera aumentó Un 12.7% en 2023 y El Perú Se mantiene Como El Segundo mayor productor de cobre del Mundo. COMEXPERU - Sociedad de Comercio Exterior Del Perú. Publicado el 16 de Febrero de 2024

Ministerio de Energía y Minas. 2024. Estudio de Impacto Ambiental del proyecto minero “Las Bambas”. Plataforma del Estado Peruano, p. 1–200.

SNC-Lavalin Perú. 2016. Resumen Ejecutivo de la Tercera Modificación del Estudio de Impacto Ambiental de la Unidad Minera Las Bambas. SENACE, p. 1–50.

Ayres, D., Zamora, L., Roesch, R., Constantinescu, N. 2024. Costos de generación de energías renovables en 2023. Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), v. 2024, p. 1–40.

International Atomic Energy Agency (IAEA). 2025. Small Modular Reactors (SMR). IAEA, plataforma técnica, p. 1–20.

Natural Resources Canada. 2022. S Call to Action: A Canadian Roadmap for Small Modular Reactors. Government of Canada, p. 1-50.

Evans, A.S., Parks, J.M., Horowitz, S., Gilbert, L., Whalen, R. 2021. U.S. Domestic Small Modular Reactor Security by Design. Sandia National Laboratories, SAND2021-0768, p. 1–60.

COES – Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional. 2025. Generación por tipo de fuente primaria – Reporte diario del 16 de julio de 2025. Disponible en: <https://www.coes.org.pe/Portal/portalinformacion/generacion>

International Energy Agency (IEA). 2022. *World Energy Outlook 2022*. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>

Ministerio de Energía y Minas del Perú. Boletín Estadístico Minero – Primer Trimestre 2025. Dirección General de Promoción Minera.

Estela, J.A., Rodríguez, C., Zamora, T., Ching, A. 2021. Energías renovables en la minería del Perú [Informe], MINSUS, p. 8-23.

NEA 2024, SMRs for Mining: Opportunities and Challenges for Small Modular Reactors, OECD, p. 31-43. Disponible en: www.oecd-nea.org/pub

Bedón, C. 2016. Libro Las Bambas. Minera Las Bamba. No. 2016-10738, p. 21.

Allen, M. 2021. Mining Energy Consumption 2021 [Informe]. Engeco & The Weir Group PLC. p. 1 - 26

Perú Petro. 2023. Indicadores de ecoeficiencia. Reporte de consumo de energía. Perú Petró. Disponible en: <https://www.perupetro.com.pe/wps/wcm/connect/corporativo>

Brian David Pajares Correa (Autor)

Ingeniero mecánico egresado de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), con una trayectoria de más de 15 años liderando proyectos de innovación, automatización y transición energética en el sector minero e industrial. Posee un **Máster en Gestión de Proyectos por la University of Maryland (EE.UU.)**, especializado en cambio organizacional, y un **MBA por Centrum Católica**, con estudios en la **University of Victoria (Canadá)** y **Maastricht University (Holanda)**.

Su experiencia profesional incluye roles estratégicos como Ingeniero Senior de Proyectos de Tecnología en Antamina, Jefe de Innovación en Minas Buenaventura, y Jefe de Innovación en Sitech Ferreycorp, donde ha dirigido la implementación de soluciones de alto impacto para el sector minero e industrias en general. Ha colaborado con consultoras de clase mundial como McKinsey, BCG y Quintil Valley, así como con start-ups tecnológicas de alto crecimiento como Space AG.

Brian es además especialista en tecnologías disruptivas aplicadas a minería, con certificaciones en Scrum Master, PMP, Six Sigma Black Belt y Machine Learning por el MIT. Actualmente impulsa proyectos relacionados con energía limpia y automatización inteligente, contribuyendo al posicionamiento del Perú como líder global en minería sostenible e innovación tecnológica. Su enfoque se basa en combinar rigor técnico con visión estratégica, proponiendo soluciones que reducen costos, aumentan productividad y mejoran la competitividad en mercados exigentes.

Yennifer Ramírez Candiotti (Co autor)

Egresada de Ingeniería Mecatrónica. Poseo sólidas habilidades de liderazgo y manejo de equipos con interés en la innovación y soluciones tecnológicas. Mi enfoque está en la gestión ágil de proyectos y diseño de producto. Destaco por mi capacidad para priorizar el valor del producto, gestionar backlog y trabajar con equipos multifuncionales para garantizar la entrega continua de soluciones estratégicas.

Maria Taipe Ricse (Co autor)

Egresada de Ingeniería Mecatrónica y profesional técnico de Mecatrónica Industrial, con experiencia en el manejo de software de diseño y modelado 3D como AutoCAD e Inventor, así como en programación y control destaco TIA Portal y MATLAB. Además, manejo herramientas clave de Microsoft como Power Automate, Power Apps y Power BI para la optimización de procesos. Me caracterizan la adaptabilidad y el compromiso con los objetivos, lo que me permite integrarme con facilidad en entornos dinámicos y contribuir activamente al logro de metas. Estoy enfocada en desarrollarme en el área de ingeniería, con especial interés en la innovación tecnológica y la automatización.