

Analysis of the economic and environmental potential of wind energy use as an alternative source in the Peruvian mining industry

José Jahir Ticlla Lozada, Mining Engineer¹; Luis Fernando Velasquez Romero, Mining Engineer²; Marco Antonio Díaz Díaz, Master of Science³; Kelly Milena Polo Herrera, Master of Science⁴
^{1,2,3,4}Universidad Privada del Norte, Perú, n00200957@upn.pe, n00172174@upn.pe, marco.diaz@upn.edu.pe,
kelly.polo@upn.edu.pe

Abstract– Mining is one of the key productive activities in the economy of many countries. However, its high energy consumption and environmental impact are worrying. This study evaluates the viability of adopting wind energy as an alternative for conventional energy sources in the Peruvian mining industry, a quantitative approach was used, with a descriptive non-experimental design, the costs and benefits associated with this transition were analyzed, and the amount of GHG emissions from the two types of energy was compared. The study revealed that the implementation of wind energy represents a significant opportunity to reduce investment, operation and maintenance costs in the long term, It was projected that the wind farm of San Juan de Marcona-Peru would require an investment of 342 million dollars, while the wind farm Punta Lomitas-Peru would require 570 million dollars in the same period, comparatively, the costs of electrical service in mining companies were estimated between 175.9968 and 2868.74784 million dollars over 30 years, furthermore, the transition to wind energy could reduce between 662,515.2 and 5,999,443.2 tons of CO₂eq emissions in three decades, these findings show that the use of wind energy as an alternative to mining is not only economically viable, but also promotes a cleaner and more sustainable economy, contributing to the protection of the environment.

Keywords: Wind energy, Green mining, Energy consumption, costs, GHG emissions.

Análisis del potencial económico y ambiental del uso de energía eólica como fuente alternativa en la industria minera peruana

José Jahir Ticlla Lozada, Ingeniero de Minas¹; Luis Fernando Velasquez Romero, Ingeniero de Minas ²; Marco Antonio Díaz Díaz, Master en Ciencia³; Kelly Milena Polo Herrera, Master en Ciencia⁴
^{1,2,3,4}Universidad Privada del Norte, Perú, n00200957@upn.pe, n00172174@upn.pe, marco.diaz@upn.edu.pe, kelly.polo@upn.edu.pe

Resumen– La minería es una de las actividades productivas clave en la economía de muchos países. Sin embargo, es preocupante su elevado consumo de energía e impacto ambiental. Este estudio evalúa la viabilidad de adoptar energía eólica como reemplazo de las fuentes convencionales de energía en la industria minera peruana. Se empleó un enfoque cuantitativo, con un diseño no experimental de tipo descriptivo, se analizaron los costos y beneficios asociados a esta transición, se comparó la cantidad de emisiones de GEI de los dos tipos de energía. El estudio reveló que la implementación de energía eólica representa una oportunidad significativa para reducir costos de inversión, operación y mantenimiento a largo plazo, se proyectó que la planta eólica San Juan de Marcona - Perú requeriría una inversión de 342 mdd, mientras que la planta Punta Lomitas- Perú demandaría 570 mdd en el mismo periodo. Comparativamente, los costos de servicio eléctrico en las empresas mineras se estimaron entre 175.9968 y 2868.74784 mdd a lo largo de 30 años. Además, la transición a energía eólica podría disminuir entre 662,515.2 y 5,999,443.2 toneladas de emisiones de CO₂eq en tres décadas. Estos hallazgos muestran que el uso de energía eólica como alternativa para las actividades mineras no solo resulta económicamente viable, sino que también promueve una economía más limpia y sostenible, contribuyendo a la protección del medio ambiente.

Palabras clave: Energía eólica, Minería verde, consumo energético, costos, emisión de GEI.

I. INTRODUCCIÓN

A. Problemática Actual

El uso de los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) desde la Revolución Industrial es uno de los principales causantes del aumento significativo de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y consecuentemente del calentamiento global [1], estos combustibles fósiles son con diferencia, los que más contribuyen al cambio climático global: representan más del 75% de las emisiones mundiales de GEI y casi el 90% de todas las emisiones de dióxido de carbono [2]. Investigaciones recientes como [3] y [4] destacan la importante contribución de la generación de electricidad a las emisiones de GEI y exploran estrategias de mitigación. La mayor parte de la

electricidad todavía se genera quemando carbón o gas natural, que libera dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno, poderosos GEI que se acumulan en la atmósfera y atrapan el calor del sol [4]. Para combatir esto, más de una cuarta parte de la producción mundial de electricidad proviene de fuentes de energía renovables eólica y solar que, a diferencia de los combustibles fósiles, emiten pocos o ningún gas contaminante al aire [5] y [6].

La referencia [7] afirma que la minería es una actividad productiva clave en la economía de muchos países, pero su elevado consumo de energía e impacto ambiental es preocupante. En el contexto del Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 7, que pretende garantizar el acceso a energía asequible, sostenible y moderna, es esencial abordar cómo la minería puede alinearse con este objetivo [8].

La transición hacia el uso de energías limpias en la minería es necesaria para incrementar la eficiencia energética, reducir la huella de carbono de la actividad y contribuir a la sostenibilidad económica [9]. El consumo de energía eléctrica es uno de los principales costos económicos en la industria minera, oscilando entre el 15% y el 40% de los costos totales de operación [10]. Con una proporción tan considerable de recursos dedicados a la producción de energía, y gran parte de ella proveniente de fuentes de combustibles fósiles, la industria minera se encuentra altamente vulnerable a las fluctuaciones del mercado energético [11].

Más de dos tercios del suministro total de energía del Perú provienen de combustibles fósiles. El petróleo representa alrededor del 43%, seguido del gas (26-31%, según algunos informes recientes) y el carbón (2%). La energía renovable representa menos del 6% de la matriz energética total del país. La energía hidroeléctrica es la forma más importante de energía renovable y representa el 35,64% de la capacidad eléctrica instalada y el 57,85% de la generación eléctrica en 2020. La Política Energética Nacional del Perú (Propuesta de Política Energética del Estado Peruano 2010-2040) tiene como objetivo diversificar la combinación energética del país y enfatiza las energías renovables y la eficiencia energética para satisfacer las necesidades de largo plazo del país [12].

B. Antecedentes de la Investigación

La referencia [13] destaca que la industria minera podría obtener beneficios mediante el uso de energía renovable, buscando así construir nuevas centrales de energía renovable y contribuir con los objetivos establecidos en la última COP 29 (Conferencia de las Partes), organizada por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), de limitar el calentamiento global a 1,5°C [14].

La referencia [11] en su investigación buscó analizar los retos, oportunidades y los enfoques que permiten integrar las tecnologías renovables en las explotaciones mineras, para ello empleó el enfoque cuantitativo, con un diseño transversal. Teniendo como resultado que, en varias regiones del mundo, la energía renovable, en particular la energía eólica, ha demostrado ser la fuente de energía más rentable en términos de Costo Elevado de Electricidad (LCOE). Además, los gastos de capital están disminuyendo constantemente. Este hecho ofrece a las empresas mineras la oportunidad de integrar la generación de energía renovable en sus procesos, permitiéndoles no solo reducir las emisiones de carbono sino también mejorar sus márgenes operativos y mitigar los riesgos asociados con la volatilidad de los combustibles fósiles. La referencia [11] tuvo como conclusión que la reducción de costes de las tecnologías eólica y solar fotovoltaica ofrece fuertes incentivos financieros para ampliar el uso de energías renovables en la industria minera.

La referencia [15] realizó el estudio “Análisis del potencial y eventuales actuales usos que tienen las fuentes de energías alternativas en la minería peruana” Tuvo como objetivo las oportunidades para la promoción del desarrollo de la generación eléctrica con recursos energéticos renovables, para ello empleó el enfoque cuantitativo, con un diseño evolutivo. Teniendo como resultado que, durante la última década, una serie de eventos ha dejado una marca en el sector energético, incluyendo la notable caída en los costos de las tecnologías renovables y su consiguiente progreso.

Las referencias [16] y [17] mencionan que la industria minera en Perú depende en gran medida de la energía eléctrica, la cual representa aproximadamente el 74.4% del consumo total de energía, variando según el tipo de minería, ubicación y tecnología empleada. Por otro lado [17] destaca en su análisis técnico sobre energías renovables en el Perú el significativo potencial eólico del país, especialmente en la zona costera, en regiones como Piura, Lambayeque, La Libertad, Áncash, Ica y Arequipa, donde las velocidades promedio del viento, a 100 metros de altura, oscilan entre 6 y 12 m/s según el Atlas Eólico del Perú (2016). Este potencial renovable podría satisfacer la creciente demanda energética de sectores como la minería y contribuir a reducir el impacto ambiental asociado al uso de combustibles fósiles.

C. Problema

¿La adopción de energía eólica en la industria minera peruana es viable como reemplazo a las fuentes de energía convencionales?

D. Objetivos

1) *Objetivo general*: Determinar si la adopción de energía eólica en la industria minera peruana es viable como reemplazo a las fuentes de energía convencionales.

2) *Objetivo específico 1* : Identificar la dependencia de las fuentes convencionales de energía en las operaciones mineras,

3) *Objetivo específico 2*: Calcular los costos de inversión, operación y mantenimiento asociados con la implementación de sistemas de energía eólica en la industria minera en comparación con las fuentes convencionales.

4) *Objetivo específico 3*: Evaluar el impacto ambiental de la integración de energía eólica en las operaciones mineras, centrándose en la reducción de emisiones de GEI, particularmente dióxido de carbono (CO₂).

II. METODOLOGÍA

A. Diseño de la Investigación

La presente investigación se enmarca en un diseño descriptivo no experimental, con un enfoque cuantitativo. Como objeto de estudio se seleccionaron seis empresas mineras, clasificadas según su consumo energético en tres categorías: mayor a 100 megavatios (MW), entre 10 y 100 MW, y menores a 10 MW de acuerdo con la clasificación estipulada por [18]. La población considerada incluye 1,363 unidades mineras en operación en el Perú durante el año 2022.

B. Metodología para alcanzar el objetivo específico 1

Con el propósito de evaluar la factibilidad de sustituir la energía convencional por energía eólica en la industria minera, a continuación, en la Fig. 1 se observa las fases de la investigación realizadas para identificar la dependencia de las fuentes convencionales de energía en las operaciones mineras.

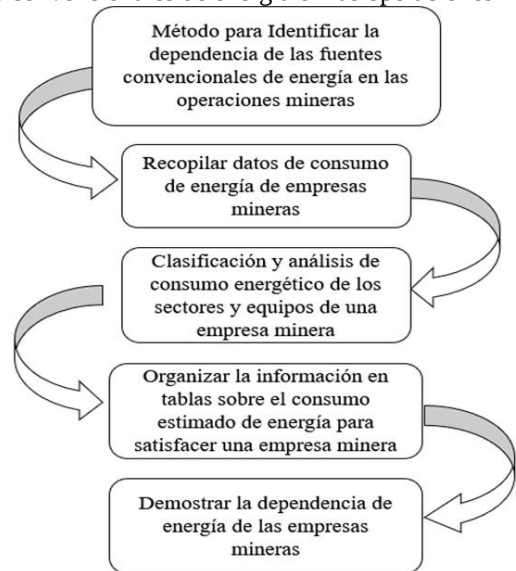


Fig. 1 Fases para identificar la dependencia de las fuentes convencionales de energía en las operaciones mineras.

Se recopiló información de [18] referente al consumo energético por parte de las empresas mineras que fueron parte del estudio (Tabla 1). Se realizó una comparación de seis empresas mineras con respecto a su demanda energética. La

selección de estas empresas se basó en varios criterios sugeridos por [15], que incluyeron su ubicación geográfica, relacionada directamente con el potencial de velocidad del viento que debe oscilar entre el 6 y 12 m/s, la disponibilidad de información relacionada con su consumo de energía, expresado en MW.

Se incluyó la clasificación y análisis de consumo energético de las instalaciones y equipos, los cuales dependen de la energía eléctrica para su operación. La información recopilada se organizó, presentando un consumo estimado de acuerdo con cada unidad minera específica. Este enfoque permite evidenciar la necesidad de energía eléctrica para el funcionamiento de la unidad minera, cabe mencionar que la Empresa Anglo American con su Proyecto Quellaveco actualmente ya está siendo proveída de energía eólica proveniente de la Central Eólica Punta Lomitas (Ica - Perú) que cuenta con una capacidad nominal de generación de 260MW, esta central proveerá los 187 MW necesarios para la etapa operativa de Quellaveco [19].

TABLA 1
RECOPILACIÓN DE DATOS DE CONSUMO ENERGÉTICO DE EMPRESAS MINERAS

Demanda energética	Empresa	Proyecto	Demanda (MW)
Mayor a 100 MW	Anglo American Quellaveco S.A.	Quellaveco	187
	Southern Perú Cooper Corporation	Los Chancas	100
Entre 10 MW y 100 MW	Minera Yanacocha S.R.L.	Yanacocha Sulfuros	75
	Compañía de Minas Buenaventura S.A.A.	San Gabriel (Ex Chucapaca)	18
Menor a 10 MW	ICM Pachapaqui S.A.C.	Ampliación Pachapaqui	10
	Ariana Operaciones Mineras S.A.C.	Ariana	10

C. Metodología para alcanzar el objetivo específico 2

En la Fig. 2 se observa las fases de la investigación realizadas para calcular los costos de inversión, operación y mantenimiento asociados con la implementación de sistemas de energía eólica en la industria minera en comparación con las fuentes convencionales.

El cálculo de los costos de inversión en centrales eólicas se llevó a cabo con (1) siguiendo el procedimiento desarrollado por [20] y empleado por [21]. De [20] se obtuvieron datos sobre los costos de inversión, operación y mantenimiento de dos centrales eólicas específicas que son San Juan de Marcona y Punta Lomitas (Tabla 2). La selección de estas centrales se realizó considerando como criterios principales la producción energética generada y la

disponibilidad de información detallada sobre cada una de ellas.

Se determinaron los costos de operación y mantenimiento siguiendo el procedimiento indicado por [20], estos costos representan el tres por ciento de la inversión inicial (Véase Tabla 3). Este enfoque permite calcular los costos de operación y mantenimiento expresados en millones de dólares.

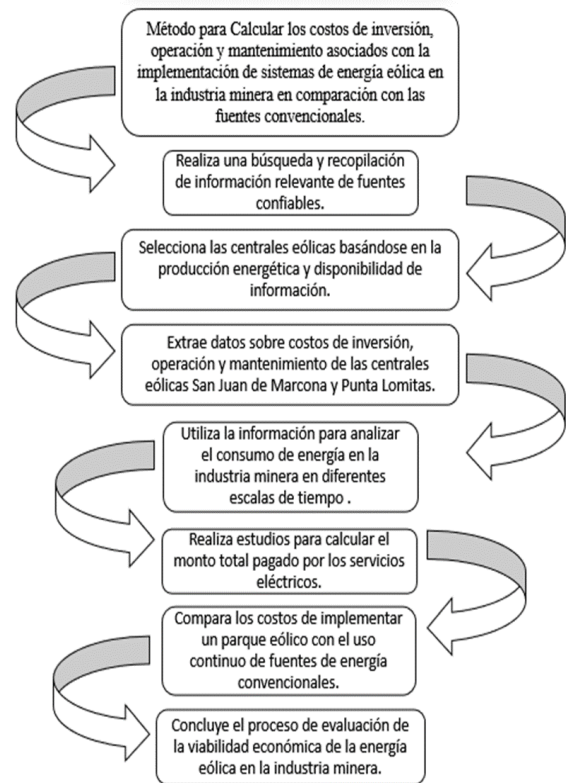


Fig. 2 Fases para identificar la dependencia de las fuentes convencionales de energía en las operaciones mineras.

$$CI = CE + EI + PA + C + I + PI + OC \quad (1)$$

Donde CE es el costo de mantenimiento, EI es el Costo de ingeniería y diseño, PA es el costo de permisos y aprobaciones, C es el costo de construcción, I es el costo de interconexiones, PI es el costo de puesta en marcha, OC son otros costos asociados.

TABLA 2
INFORMACIÓN GENERAL DE CENTRALES EÓLICAS OPERANDO EN PERÚ

Parque Eólico	Potencia instalada (MW)	Cantidad de Aerogeneradores	Potencia por cada aerogenerador (MW)	Ubicación
San Juan de Marcona	131	23	5,7	Ica
Punta Lomitas	260	50	5,2	Ica

TABLA 3
COSTOS DE INVERSIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE CENTRALES EÓLICAS

Parque Eólico	Costo de inversión en Mdd	Costo de O&M en Mdd por año
San Juan de Marcona	180	5,4
Punta Lomitas	300	9

D. Metodología para alcanzar el objetivo específico 3

En la Fig. 3 se observa las fases de la investigación realizadas para evaluar el impacto ambiental de la integración de energía eólica en las operaciones mineras, centrándose en la reducción de emisiones de GEI, particularmente dióxido de carbono (CO₂)

Flujograma 1

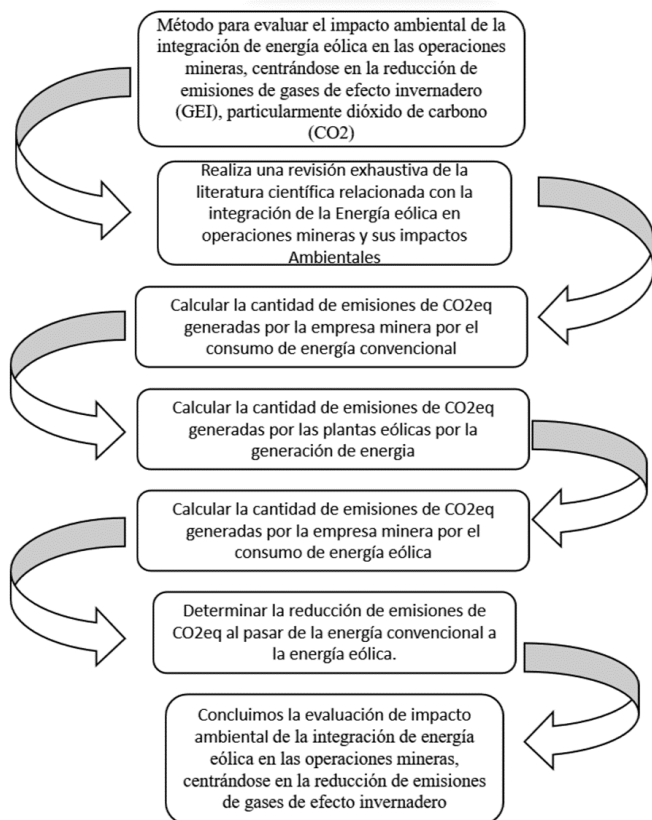


Fig. 3 Fases para evaluar el impacto ambiental de la integración de energía eólica en las operaciones mineras.

Para el cálculo de las emisiones de GEI se tomó en cuenta la metodología e información del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero-2019 (INGEI) [22], Es preciso mencionar que el INGEl-2019 fue elaborado en el marco de la plataforma INFOCARBONO [23] del Ministerio del Ambiente-Perú (MINAM) siguiendo la metodología sugerida por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) directriz propuesta por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) a nivel mundial y adaptadas a la realidad de cada país.

Con (2) se obtuvieron las emisiones de GEI (E_{GEI}) de las empresas mineras incluidas en el estudio (Tabla 4), multiplicando el factor de emisión (FE) en tCO₂eq/MWh por la energía consumida (EC) en MWh. Dando como resultado las emisiones del GEI en tCO₂eq/MWh. El Factor de emisión para la actividad minera en Perú es de 0.151 tCO₂eq/MW [22].

$$E_{GEI} = FE * EC \quad (2)$$

TABLA 4
EMISIONES DE GEI POR CONSUMO ENERGÉTICO DE LAS EMPRESAS MINERAS SELECCIONADAS

Empresas mineras	Emisiones de GEI por consumo energético – (tCO ₂ eq/MWh)	Emisiones de GEI por consumo energético – (tCO ₂ eq/MW Día)	Emisiones de GEI por consumo energético – (tCO ₂ eq/MW Mes)	Emisiones de GEI por consumo energético – (tCO ₂ eq/MW Año)
Anglo American Quellaveco S.A. (163 MW)	24.613	590.712	17721.36	212656.3
Southern Perú Cooper Corporation (100 MW)	15.100	362.400	10872	130464
Minera Yanacocha S.R.L. (75 MW)	11.325	271.800	8154	97848
Compañía de Minas Buenaventura S.A.A. (18 MW)	2.718	65.232	1956.960	23483.52
ICM Pachapaqui S.A.C. (10 MW)	1.510	36.240	1087.200	13046.40
Ariana Operaciones Mineras S.A.C. (10 MW)	1.510	36.240	1087.200	13046.40

Con (3) se calculó la emisión de GEI de las plantas eólicas (E_{EE}) incluidas en el estudio (Tabla 5), multiplicando la generación de energía de la planta eólica (G_{PE}) en MW por el factor de emisión de energía eólica (FE_{EE}) expresado en tCO_2 eq/MWh. Este procedimiento permite evaluar las emisiones asociadas a la generación de energía mediante fuentes eólicas. La huella de carbono de los parques eólicos del Perú es de 9 Kg CO_2 eq/MWh también se puede expresar como 0.009 t CO_2 eq/MWh. [24]

$E_{EE} = G_{PE} * FE_{EE}$ (3)

TABLA 5
FACTOR DE EMISIÓN DE GEI DE LAS PLANTAS EÓLICAS POR LA DE
ENERGÍA ELÉCTRICA GENERADA

Parque Eólico	Emisiones de GEI por energía generada (tCO2eq/MW h)	Emisiones de GEI por energía generada (tCO2eq/MW Día)	Emisiones de GEI por energía generada (tCO2eq/MW Mes)	Emisiones de GEI por energía generada (tCO2eq/MW Año)
San Juan de Marcona	1.179	28.296	848.880	10186.560
Punta Lomitas	2.340	56.160	1684.800	20217.600

IV. RESULTADOS

A. Resultados

En la Fig. 4 se muestran los porcentajes del consumo aproximado de energía por sector perteneciente a la unidad minera, dicho consumo varía dependiendo de la cantidad de personal y equipo con los que cuente la empresa minera. Sin embargo, es fundamental recalcar que toda empresa minera requiere de campamentos y operaciones mineras para su funcionamiento donde es inevitable el consumo energético por parte de la maquinaria y/o los trabajadores.

En la Fig. 5 se muestra la dependencia energética de las empresas mineras objeto de estudio. Según [16] la dependencia de la energía eléctrica en la industria minera es alta y varía según el tipo de minería, la ubicación y la tecnología utilizada. En general, se estima que la energía eléctrica representa alrededor del 74.4% del consumo total de energía en la industria minera.

En la Fig. 6 se presenta la comparación de los costos de inversión asociados a los parques eólicos del estudio, tales como San Juan de Marcona y Punta Lomitas que poseen una potencia instalada de 131 MW y 260 MW respectivamente. Dentro de ellos, la inversión inicial varía dependiendo de la potencia instalada en MW y la cantidad de aerogeneradores que estas plantas poseen o están destinadas a instalar (Tabla 2).

En la Figura 7 se presentan las comparaciones de los costos de operación y mantenimiento asociados a la implementación de las centrales eólicas San Juan de Marcona y Punta Lomitas en un periodo de 1 año, contrastados con los costos a lo largo de 30 años. Según [21] los costos de

operación y mantenimiento varían entre el 2% y el 3% anual del costo de inversión inicial de una central eólica. En este caso, se tomó el 3% por año.

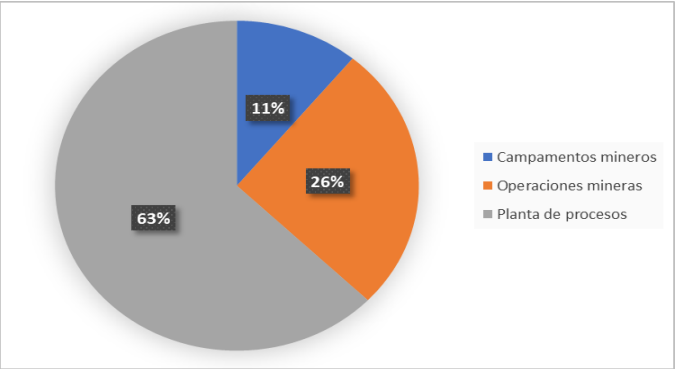


Fig. 4 Consumo aproximado de energía por sector en unidad minera.

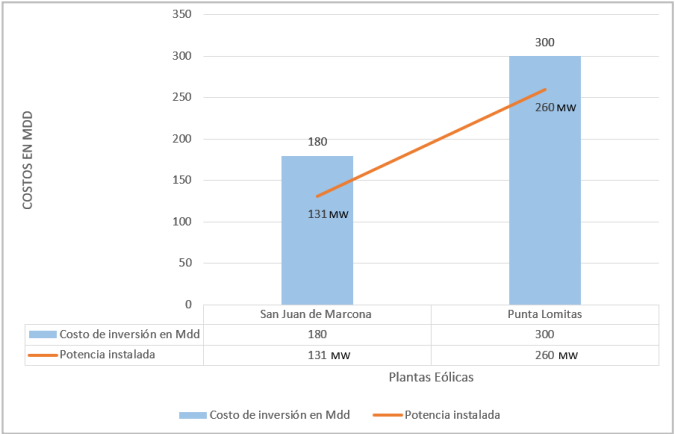


Fig. 5 Dependencia de las fuentes convencionales de energía en las operaciones mineras.

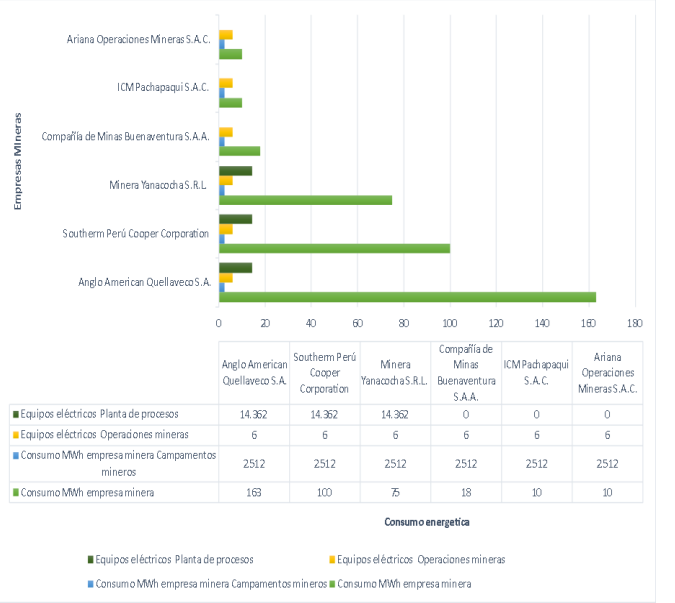


Fig. 6 Costos de Inversión de Parques Eólicos en Mdd según su potencia instalada en MW.

En la Fig. 8 se muestra la comparación de la implementación de sistema de energía eólica por 30 años en comparación con la energía convencional, todos los datos están expresados en Millones de dólares (Mdd), donde los proyectos eólicos San Juan de Marcona y Punta Lomitas ambos proyectos de estudio están expresados de color verde y muestran cuánto cuesta implementar y mantener su funcionamiento por 30 años, comparando con los costos que se requieren por la misma cantidad de años pero usando energía convencional.

En la Fig. 9 se muestra las emisiones de GEI a través del tiempo (Tabla 4), siendo los gráficos de color azul las emisiones de un año y de color naranja las emisiones de 30 años del uso de la energía convencional en las empresas mineras de estudio. En la Fig. 10 se muestra las emisiones de GEI a través del tiempo (Tabla 5), siendo los gráficos de color verde las emisiones de un año y de color morado las emisiones de 30 años del uso de la energía eólica en las empresas mineras de estudio.

En la Fig. 11 se evidencia el impacto de la reducción de emisiones de CO₂eq derivado de la implementación de energía eólica en las empresas mineras, en comparación con las emisiones de CO₂eq que las empresas mineras tendrían utilizando energía convencional a lo largo de un periodo de 1 año. En la Fig. 12 se evidencia el impacto de la reducción de emisiones de CO₂eq derivado de la implementación de energía eólica en las empresas mineras, en comparación con las emisiones de CO₂eq que las empresas mineras tendrían utilizando energía convencional a lo largo de un periodo de 30 años.

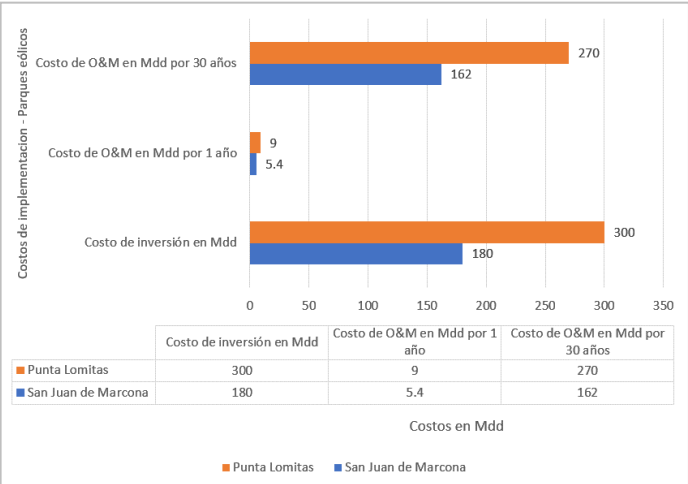


Fig. 7 Costos de Operación y Mantenimiento de Parques Eólicos

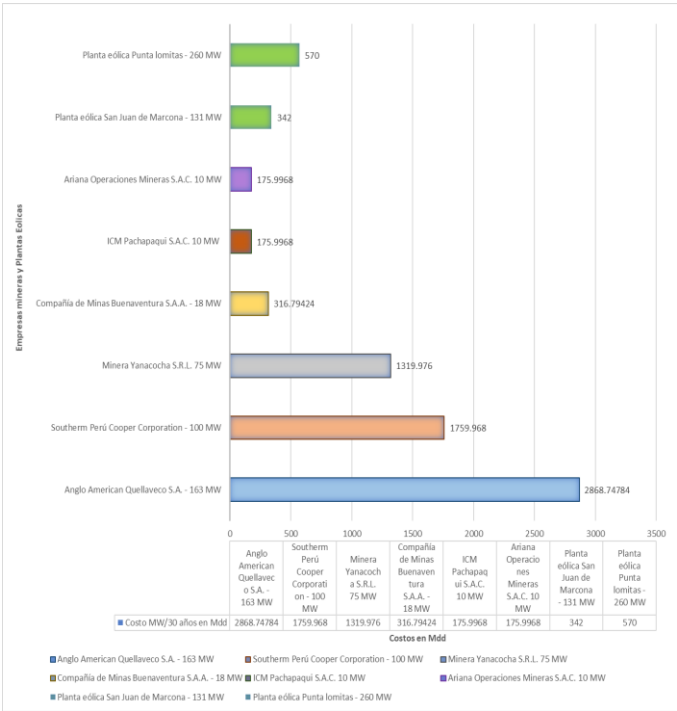


Fig. 8 Comparativa en costos de implementación de energía eólica por 30 años en comparación con la energía convencional.

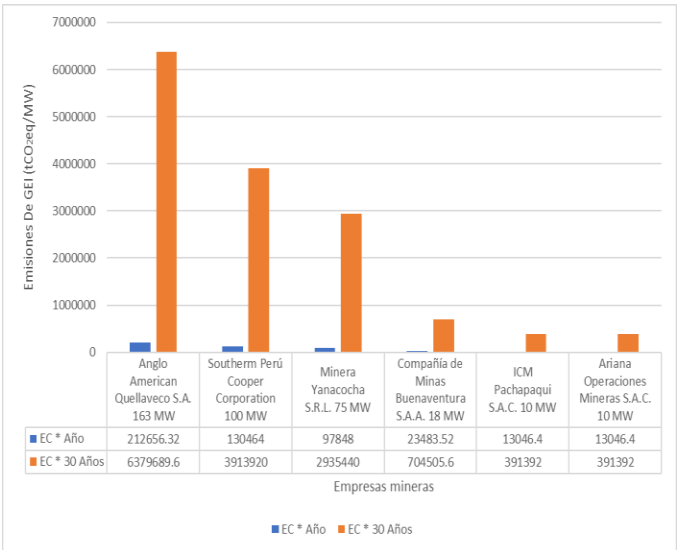


Fig. 9 Emisiones de GEI (tCO₂eq/MW) de energía convencional (EC) de 1 – 30 años

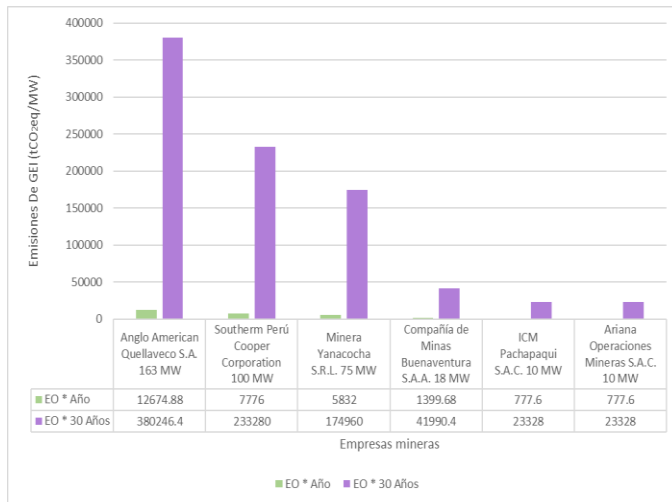


Fig. 10 Emisiones de GEI (tCO₂eq/MW) de energía eólica (EO) de 1 a 30 años.

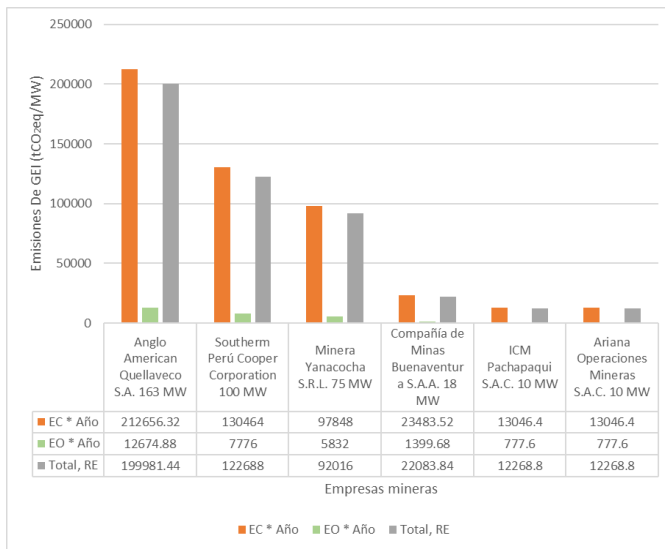


Fig. 11 Reducción de emisiones de GEI (t CO₂eq/MW) por 1 año

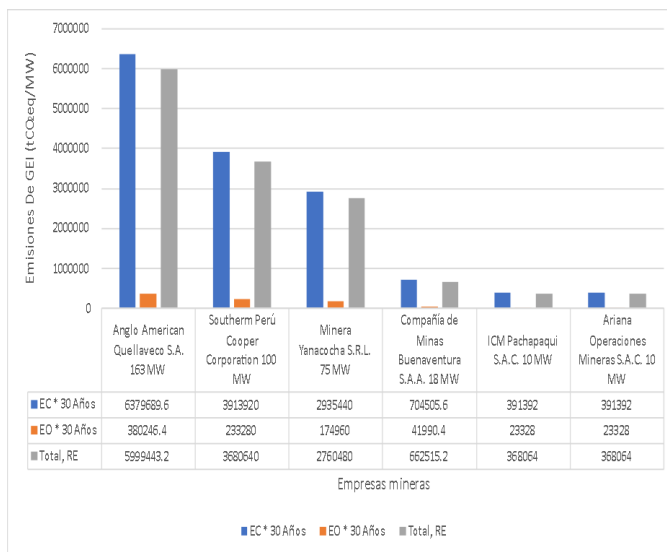


Fig. 12 Reducción de emisiones de GEI (t CO₂eq/MW) por 30 años

B. Discusión

La referencia [16] señala que la industria minera tiene una alta dependencia de la energía eléctrica, representando aproximadamente el 74.4% del consumo total de energía en este sector. La Fig. 4 ilustra claramente esta dependencia energética, destacando la necesidad absoluta de energía eléctrica para operar eficientemente en las empresas mineras estudiadas. Se identifican tres áreas principales de consumo mínimo de energía: equipos eléctricos en operaciones mineras (6 MW mínimo), campamentos mineros (2.512 MW mínimo) y equipos eléctricos en planta de procesos (14.362 MW mínimo), cada una con sus propias demandas energéticas mínimas, influenciadas por factores como la cantidad de equipos activos y el personal contratado. La distribución del consumo requerido por las empresas mineras en MW muestra una variabilidad significativa, con ciertas empresas, como Anglo American Quellaveco S.A. (163 MW), Southern Peru Copper Corporation (100 MW) y Minera Yanacocha S.R.L. (75 MW), destacando con demandas más altas. Se observa una correlación entre la demanda de energía y la presencia de una planta de procesos propia, ya que las empresas con una mayor demanda energética suelen contar con esta infraestructura. En contraste, empresas como Compañía Minera Buenaventura S.A.A. (18 MW), ICM Pachapaqui S.A.C. y Ariana Operaciones Mineras S.A.C. tienen una demanda de 10 MW cada una. Estos datos subrayan la necesidad crítica de energía eléctrica para el funcionamiento de las empresas mineras.

Los resultados de este estudio sugieren que la implementación de sistemas de energía eólica en la industria minera presenta una oportunidad significativa para reducir los costos de inversión, operación y mantenimiento en comparación con las fuentes convencionales de energía. La comparación detallada de los costos de energía eléctrica entre plantas eólicas y empresas mineras estudiadas resalta la viabilidad económica de adoptar energías renovables. Por ejemplo, la planta eólica San Juan de Marcona, con una potencia instalada de 131 MW, requeriría una inversión total de 342 millones de dólares para operar y mantener durante 30 años, mientras que la planta eólica Punta Lomitas, con 260 MW, tendría un costo de inversión, operación y mantenimiento de 570 millones de dólares durante el mismo período. En contraste, las empresas mineras estudiadas enfrentarían costos sustancialmente más altos por el servicio eléctrico en 30 años, que oscilan entre 175.9968 y 2868.74784 Mdd. Además, la creciente accesibilidad económica de las tecnologías de energía renovable, señalada por [6] respalda aún más el potencial de las energías renovables como una opción atractiva para la industria minera, incluso en regiones donde la dependencia histórica de los combustibles fósiles ha sido alta. En resumen, la transición hacia la energía eólica puede no solo ser económicamente eficiente, sino también ambientalmente sostenible, lo que subraya su importancia en el panorama energético actual y futuro de la industria minera.

La referencia [25] destaca la importancia crucial de abordar el cambio climático global, con los combustibles fósiles identificados como los principales contribuyentes. Esta

urgencia se ve reflejada en la Política Energética Nacional del Perú, que busca diversificar la matriz energética hacia fuentes renovables y mejorar la eficiencia energética. La Fig. 12 muestra claramente el impacto positivo de la integración de energía eólica en las operaciones mineras, evidenciando reducciones significativas en las emisiones de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) a lo largo de 30 años. Se observa que empresas como Anglo American Quellaveco S.A., utilizando energía eólica mediante la implementación de su propio complejo eólico, podrían reducir hasta 5,999,443.2 toneladas de CO₂eq, mientras que otras, como Southern Peru Copper Corporation, Minera Yanacocha S.R.L., Compañía Minera Buenaventura S.A.A., ICM Pachapaqui S.A.C. y Ariana Operaciones Mineras S.A.C., experimentarían reducciones que oscilan entre 662,515.2 y 3,680,640 toneladas de CO₂eq. Estos resultados subrayan el impacto ambiental positivo de la energía eólica en la industria minera, no solo en términos de reducción de emisiones de GEI, sino también en la mejora de la eficiencia operativa y la disminución de la dependencia de los combustibles fósiles. Este enfoque, como menciona [11], no solo beneficia a las empresas mineras en términos de sostenibilidad ambiental, sino que también puede impulsar el desarrollo económico local y mejorar la aceptación social.

C. Implicancias

Adoptar sistemas de energía eólica en la industria minera podría contribuir al avance de teorías relacionadas con la transición hacia fuentes de energía más limpias y renovables en sectores industriales clave, [13] destacó que la industria minera podría obtener beneficios mediante el uso de energía renovable, buscando así construir nuevas centrales de energía renovable y alcanzar los objetivos establecidos en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, esto podría incluir la aplicación de conceptos de teorías de transición energética y modelos de desarrollo sostenible para comprender mejor los desafíos y oportunidades asociados con la integración de energía eólica en el sector minero.

Desde una perspectiva práctica, la implementación del proyecto podría tener varias implicaciones concretas en la construcción, operación y mantenimiento de los parques eólicos. Por ejemplo, podría conducir a la creación de empleo local y extranjero, lo que beneficiaría a las comunidades cercanas y al país. [26] menciona que, la energía eólica sigue siendo la tecnología más eficiente para generar energía de forma segura y respetuosa con el medio ambiente: libre de emisiones, inagotable y crea prosperidad y empleo.

Desde una perspectiva social: La generación de empleo local asociada con la implementación de sistemas de energía eólica en la industria minera podría proporcionar oportunidades de trabajo estables y bien remuneradas para las comunidades cercanas a las minas, lo que contribuiría al desarrollo económico regional. Según [27] para la implementación de un parque Eólico menor a 5 aerogeneradores, se suele emplear un máximo de 50 personas

aproximadamente, estos puestos de trabajo varían de acuerdo con el tamaño del proyecto y la ubicación geográfica.

Del consumo de energía: Mejora de la calidad del aire resultante de la reducción de la dependencia de las fuentes de energía convencionales tendría beneficios directos para la salud de las personas que viven y trabajan en áreas mineras, reduciendo la incidencia de enfermedades respiratorias y mejorando la calidad de vida. Asimismo, la adopción de energía eólica podría conducir a una reducción del impacto ambiental general de la industria minera, al disminuir las emisiones de GEI y la contaminación del agua y el suelo, lo que contribuiría a la conservación de los ecosistemas locales y la biodiversidad. Para [28] la implementación de la energía eólica conlleva la disminución de los gastos energéticos a largo plazo, la reducción de la necesidad de combustibles fósiles y la ampliación de las fuentes de energía utilizadas. Asimismo, tiene un impacto positivo en la reducción de las emisiones de contaminantes gaseosos, en la mejora de la percepción ambiental de la compañía minera y en el cumplimiento de las normativas más rigurosas establecidas

IV. CONCLUSIONES

Se logro identificar la dependencia de las fuentes convencionales de energía en las operaciones mineras, revelándose una alta dependencia de la energía eléctrica en este sector, los datos recopilados indican que aproximadamente el 74.4% del consumo total de energía en la industria minera está destinado a la electricidad, con áreas clave de consumo que son, equipos eléctricos en operaciones mineras (6 MW mínimo), campamentos mineros (2.512 MW mínimo) y equipos eléctricos en planta de procesos (14.362 MW mínimo). Con respecto a la distribución de los consumos mínimos de energía por sector destaca la variabilidad en las demandas energéticas, estas son influenciadas por factores como la cantidad de equipos activos y personal contratado. Finalmente podemos decir que los datos presentados revelan la dependencia de la energía eléctrica en la industria minera.

Se evaluó la implementación de sistemas de energía eólica en la industria minera donde presentan una oportunidad significativa para reducir los costos de inversión, operación y mantenimiento en comparación con las fuentes convencionales de energía, la planta eólica San Juan de Marcona, con una potencia instalada de 131 MW, requeriría una inversión total de 342 millones de dólares para operar y mantener durante 30 años, mientras que la planta eólica Punta Lomitas, con 260 MW, tendría un costo de inversión, operación y mantenimiento de 570 millones de dólares durante el mismo período. En contraste, las empresas mineras estudiadas enfrentarían costos sustancialmente más altos por el servicio eléctrico en 30 años, que oscilan entre 175.9968 y 2868.74784 millones de dólares. En resumen, la transición hacia la energía eólica puede ser económicamente eficiente.

Se evaluó el impacto positivo de la integración de energía eólica en las operaciones mineras, específicamente en la

reducción de emisiones de GEI, con un enfoque particular en el dióxido de carbono (CO₂). Anglo American Quellaveco S.A. podría resultar en la reducción de hasta 5,999,443.2 toneladas de CO₂eq. durante un período de 30 años. Asimismo, otras empresas mineras podrían experimentar reducciones significativas en sus emisiones, que oscilan entre 662,515.2 y 3,680,640 toneladas de CO₂eq. En resumen, la integración de energía eólica en la industria minera representa una estrategia clave para avanzar hacia una economía más sostenible y resiliente al cambio climático.

Se determinó que la adopción de energía eólica en la industria minera peruana es viable como reemplazo a las fuentes de energía convencionales, es necesaria una futura evaluación más detallada que permita cuantificar las ventajas de la adopción de energía eólica en términos de eficiencia energética e impacto ambiental, teniendo en cuenta factores claves necesarios como son la ubicación geográfica (potencial de velocidad del viento), costos de inversión en construcción, implementación, tecnología y funcionamiento, la adopción de energía eólica también ofrece oportunidades para reducir costos de inversión, operación y mantenimiento a largo plazo, como se muestra en la planta eólica San Juan de Marcona y Punta Lomitas, cuyos costos de inversión total serían de 342 y 570 millones de dólares respectivamente. Además, la transición hacia la energía eólica tiene un impacto positivo en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, con posibles reducciones que oscilan entre 662,515.2 y 5,999,443.2 toneladas de CO₂eq durante un período de 30 años, lo que contribuye significativamente a la mitigación del cambio climático y promueve una economía más sostenible. En conclusión, la adopción de energía eólica en la industria minera peruana no solo es factible, sino que también es una estrategia clave para avanzar hacia una economía más limpia, sostenible y resiliente al cambio climático.

REFERENCES

- [1] D. Iglesias Márquez and B. F. Pérez, "Anhelando justicia en la era del cambio climático: de la teoría a la práctica". RCDA, vol. 9, no. 2, Dec. 2018. Acceso: Ene.21,2025. [En línea]. Disponible doi: <https://doi.org/10.17345/2482>
- [2] F. Mondragón, "Ciclos del dióxido de carbono en la formación y utilización de combustibles fósiles y su efecto en el cambio climático". Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 2022. Acceso: Ene. 21,2025. [En línea]. Disponible doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1364>.
- [3] R. Correa, Aportación de la UNAM para capturar gases de efecto invernadero, Investigación de académica (sic) del Instituto de Ingeniería. 2020. Acceso: Ene. 21,2025. [En línea]. Disponible: <https://www.gaceta.unam.mx/aportacion-de-la-unam-para-capturar-gases-de-efecto-invernadero/>
- [4] B. E. Saavedra, "Huella de carbono: emisiones de GEI por uso del sistema de iluminación de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Perú", *TECNIA*, vol. 30, n.º 1, pp. 121–136, May 2020. Acceso: Ene. 21,2025. [En línea]. Disponible doi: <https://doi.org/10.21754/tecnia.v30i1.827>
- [5] A. I. Ramos-Sanz, "Determinación de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en una matriz energética sustentable mediante análisis de escenarios. Estudio de caso en zonas áridas con alto riesgo hídrico", *Rev. archit.*, vol. 22, n.º 2, pp. 114–125, May. 2020. Acceso: Ene. 21,2025. [En línea]. Disponible doi: <https://doi.org/10.14718/RevArq.2020.2752>
- [6] Naciones Unidas. *Naciones Unidas*. 2021. Acceso: Ene. 21,2025. [En línea]. Disponible: <https://www.un.org/es/climatechange/science/causes-effects-climate-change>.
- [7] R. Domínguez, "Industrias extractivas y desarrollo sostenible en américa latina: ¿oxímoron o nuevo imaginario desarrollista?", *Autoctonia Revista De Ciencias Sociales E Historia*, vol. 5, no. 2, p. 405–437, 2021. Acceso: Ene. 21,2025. [En línea]. Disponible doi: <https://doi.org/10.23854/autoc.v5i2.179>
- [8] H. Ponce, E. Magaña, M. Oliva, & F. Guillen-Gámez, "Objetivos de desarrollo sostenible y formación inicial: apostando por la competencia comunicativa y metodologías activas desde sus concepciones docentes", *Revista Lusófona De Educação*, no. 61, p. 89–108, 2024. Acceso: Ene. 21,2025. [En línea]. Disponible doi: <https://doi.org/10.24140/issn.1645-7250.rle61.06>
- [9] N. Rubiano, R. Jimenez, J. Angel, & V. Cortes, "Importancia de la energía renovable en las generaciones futuras", *Revista Agunkuyã*, vol. 9, no. 1, p. 1–15, 2019. Acceso: Ene. 21,2025. [En línea]. Disponible doi: <https://doi.org/10.33132/27114260.1780>
- [10] S. Vargas, C. Sanfilippo, & A. García, "Análisis del costo de la energía eléctrica en panamá frente al precio del petróleo", *I+D Tecnológico*, vol. 18, no. 2, p. 5–16, 2022. Acceso: Ene. 21,2025. [En línea]. Disponible doi: <https://doi.org/10.33412/idt.v18.2.3710>
- [11] T. Igogo, K. Awuah-Offei, A. Newman, T. Lowder, & J. Engel-Cox, "Integrating renewable energy into mining operations: opportunities, challenges, and enabling approaches", *Applied Energy*, vol. 300, p. 117375, 2021. Acceso: Ene. 21,2025. [En línea]. Disponible doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117375>
- [12] Global Energy Monitor contributors. (22 de Julio de 2022). Global EnergyMonitor. https://www.gem.wiki/w/index.php?title=Perfil_energ%C3%A9tica:_Per%C3%BA&oldid=351785
- [13] A. Navarro Montejo, J. Delgadillo y C. Alonso, "Estrategias De Reducción De Costos Asociados Al Cobre De La Energía Eléctrica Consumida Por La Industria Minera De Zacatecas, Durango, Sonora, Chihuahua Y Guerrero". 2020. Acceso: Ene. 21,2025. [En línea]. Disponible doi: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14732.13447>.
- [14] B. Buchner, "Cop29's climate investment imperative", *Science*, vol. 386, no. 6722, p. 601–601, 2024. Acceso: Ene. 21,2025. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1126/science.adu3212>
- [15] A. Ching, J. Estela, C. Rodriguez y T. Zamora, "Análisis del potencial y eventuales actuales usos que tienen las fuentes de energías alternativas en la minería peruana". Chile. 2021. Acceso: Ene. 21,2025. [En línea]. Disponible: <https://minsus.net/mineria-sustentable/wp-content/uploads/2021/02/Energias-renovables-en-la-mineria-del-Peru.pdf>
- [16] MINEM, "Balance Nacional de Energía", 2021. Acceso: Ene. 21,2025. [En línea]. Disponible: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4673983/PLAN%20NACIONAL%20DE%20ENERG%C3%8DA%202021.pdf?v=1686599146>
- [17] V. Gonzales Zamora, "Estado de las energías renovables en el Perú". *CITEenergía*. 2020. Acceso: Ene. 21,2025. [En línea]. Disponible: http://www.citeenergia.com.pe/wp-content/uploads/2021/01/Ing.-Victor-Gonzales-Zamora_1.pdf
- [18] Osinergmin, "Reporte De Análisis Económico Sectorial". 2022. Acceso: Ene. 21,2025. [En línea]. Disponible: https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/RAES/RAES-Mineria-diciembre-2022-GPAE-OS.pdf
- [19] AngloAmerican, "Quellaveco se transforma para recibir energías renovables, AngloAmerican", 2025. Acceso: Ene. 20, 2025. [En línea]. Disponible: <https://peru.angloamerican.com/innovacion/energias-renovables/quellaveco-se-transforma-para-recibir-energias-renovables.aspx>
- [20] A. Ryzhkov, *FINMODELSLAB*. 2023 Acceso: Ene. 20, 2025. [En línea]. Disponible: <https://finmodelslab.com/es/blogs/startup-costs/wind-farm-startup-costs>
- [21] Brücken Consult Bolivia S.R.L., "Estudio de determinación de Costos de Operación, Mantenimiento y Administración Fijos de Generación con base en Energías Alternativas". 2019. Acceso: Ene. 20, 2025. [En línea]. Disponible: <chrome://>

- extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://energypedia.info/images/e/e2/Estudio_Costos_Fijos_OMA-Generacion_SOLAR_FV.pdf
- [22] *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 2000-2019*, 1a ed., MINAM, Lima, Perú, 2020. Acceso: Ene. 20, 2025. [En línea]. Disponible: <https://infocarbono.minam.gob.pe/annios-inventarios-nacionales-gei/ingei-2019/>
- [23] MINAM, Infocarvobno, Minam, 2020. Acceso: Ene. 20, 2025. [En línea]. Disponible: <https://infocarbono.minam.gob.pe>
- [24] O. Toledano, *Rotecna*. 2019. Acceso: Ene. 20, 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.rotecna.com/blog/como-luchar-contr-el-cambio-climatico-desde-nuestras-granjas>
- [25] A. Gordillo Valdez, M. Montoya Granda, y P. A. Salinas Pedemonte, “Análisis del desarrollo y potencial de la energía eólica en el Perú”, *Ing. ind. (Lima)*, vol. 43, n.º 43, pp. 177-198, oct. 2022.
- [26] Acciona, *Acciona*. 2022. Acceso: Ene. 20, 2025. [En línea]. Disponible: https://www.acciona.com/es/energias-renovables/energia-eolica/?_adin=02021864894
- [27] Energía Estratégica, *Energía Estratégica*. 2016. Acceso: Ene. 20, 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.energiaestrategica.com/todos-los-pasos-la-construccion-exitosa-parque-eolico-los-secretos-tecnicos-comerciales/#:~:text=Para%20un%20parque%20porte%20menor,m%C3%A1ximo%20de%2050%20personas%20aproximadamente>
- [28] NLMK, *NLMK*. 2020. Acceso: Ene. 20, 2025. [En línea]. Disponible: <https://nlmkperu.com/la-energia-eolica-y-el-impulso-hacia-la-sostenibilidad-en-la-mineria-peruana/>