

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATÓLICA DEL PERÚ**

Escuela de posgrado



Análisis de la inserción de programas de eficiencia energética
para mejorar la competitividad y sostenibilidad del sector
minero cuprífero en el Perú

Tesis para optar el grado académico de Maestro en Energía
que presenta:

Carlos Augusto Mendoza Carrera

Asesor:

Mgtr. Fernando Jiménez Ugarte

Lima, 2024

Informe de Similitud

Yo, Fernando Octavio Jiménez Ugarte, docente de la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada Análisis de la inserción de programas de eficiencia energética para mejorar la competitividad y sostenibilidad del sector minero cuprífero en el Perú, de el autor Carlos Augusto Mendoza Carrera, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 18%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 5/06/2024.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de investigación, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha:

Lim, 16 de Agosto de 2024.

Apellidos y nombres del asesor: <u>Jiménez Ugarte, Fernando Octavio</u>	
DNI: 08734404	Firma
ORCID: 0000-0003-0540-9481	

Agradecimiento

A mi familia.



Resumen

Esta investigación tiene como objetivo determinar la importancia de los Programas de Eficiencia Energética (EE) que se han implementado y se encuentran en plena ejecución para el período 2021-2049, con el propósito de medir su impacto en el consumo energético de electricidad en el sector minero del cobre. El estudio implicó recopilar datos históricos de las empresas mineras sobre la producción de cobre y el consumo de electricidad de 2011 a 2020. También se consideraron proyecciones de futuras inversiones en nuevos proyectos mineros, específicamente de producción de cobre, a partir de 2021, con base en información confirmada por el Ministerio de Energía y Minas (Minem).

Se recopiló información relevante sobre la normativa que regula la producción de minerales y el consumo de energía, así como los resultados de los programas de eficiencia energética y su avance en América Latina y Perú hasta la fecha. La investigación examinó la situación del sector minero local y sus implicancias en el mercado internacional, considerando factores como la inversión del sector, la producción de cobre, la demanda de energía en la minería metálica, la cartera de proyectos de mediano y largo plazo, la matriz energética, la integración de industrias no convencionales, las energías renovables y la implementación de tecnologías de eficiencia energética en la minería peruana. Además, el estudio tuvo en cuenta el impulso de la demanda de minerales críticos en el mercado global para la transición energética y fuentes de energía respetuosas con el medio ambiente.

Se realizó un análisis cuantitativo de la proyección en la producción de cobre para el período 2021-2049 y en este se incorporó una variable exógena, como lo son las inversiones futuras en cobre. Se calculó el índice de crecimiento de la producción de cobre, lo que dio como resultado una proyección anual. A partir de esos resultados, se determinó el consumo de energía, el cual está vinculado al factor de emisión de las fuentes primarias de producción eléctrica que está relacionado con la energía consumida por unidad de peso. En cuanto a la intensidad energética, la investigación reporta una ecuación de curva potencial ($Y = 17,39 * X^{-0,366}$ GJ/TM) que representa la intensidad energética del proceso (beneficio) en relación con la ley del mineral. Se espera que la implementación de programas de eficiencia energética altere el comportamiento de la curva potencial hacia cambios de menor intensidad, lo que conducirá a un ahorro de energía.

El estudio concluye con gráficos de líneas que ilustran los cambios en los indicadores de intensidad energética y en las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) para diferentes escenarios, con lo que refleja las variaciones causadas por la implementación de Programas de Eficiencia Energética. La investigación también incluye un capítulo sobre «Alcances y análisis en la producción y consumo de energía para concentrado de cobre», en el que se

presentan dos escenarios: uno con un Sistema de Gestión de Eficiencia Energética (EEMS) integral y el otro con la implementación de mejoras tecnológicas por etapas. Los escenarios proponen dos tipos de gestión con resultados distintos, lo que ayuda a comparar los objetivos finales marcados por cada contexto.



Abstract

This research aims to determine the importance of Energy Efficiency (EE) Programs that have been implemented and are in full execution for the period 2021-2049, with the goal of measuring their impact on the energy consumption of electricity in the copper mining sector. The study involved collecting historical data from mining companies on copper production and electricity consumption from 2011 to 2020. Projections for future investments in new mining projects, specifically copper production, from 2021 onwards were also considered based on information confirmed by the Ministry of Energy and Mines (Minem).

Relevant information regarding regulations on mineral production and energy consumption was gathered, along with the results of Energy Efficiency Programs and their progress in Latin America and Peru up to the present date. The research examined the local mining sector's situation and its implications in the international market, considering factors such as sector investment, copper production, energy demand in metallic mining, the portfolio of medium and long-term projects, the energy matrix, the integration of unconventional renewable energies, and the implementation of energy efficiency technologies in Peruvian mining. Additionally, the study took into account the push for demand in critical minerals in the global market for energy transition and environmentally friendly energy sources.

A quantitative analysis of the copper production projection for the period 2021-2049 was conducted, incorporating an exogenous variable, namely future copper investments. The growth index of copper production was calculated, resulting in an annual projection. From the copper production results, energy consumption was determined, linked to the emission factor of primary sources of electricity production related to energy consumed per unit weight. Regarding energy intensity, the research reports a potential curve equation ($Y = 17.39 * X^{-0.366}$ GJ/TM) representing the energy intensity of the process (beneficiation) relative to the ore grade. The implementation of Energy Efficiency Programs is expected to alter the potential curve behavior with less intensity changes, leading to energy savings.

The study concludes with line graphs illustrating the shifts in energy intensity and carbon dioxide (CO₂) emissions indicators for different scenarios, reflecting variations due to the implementation of Energy Efficiency Programs. The research also includes a chapter on "Scope and Analysis in the Production and Consumption of Energy for Copper Concentrate", presenting two scenarios: one with a comprehensive Energy Efficiency Management System (EEMS) and the other with the implementation of technological improvements in stages. These scenarios propose two types of management with distinct results, aiding in the comparison of final objectives set by each context.

Tabla de contenidos

Agradecimiento.....	2
Resumen	3
Abstract	5
Lista de ilustraciones	10
Lista de tablas	12
Glosario de términos.....	14
Introducción	18
EXPLORAR CONTEXTOS Y DEFINIR ÁMBITOS DE IMPACTO SOBRE LA INVESTIGACIÓN	19
DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	20
PROPUESTA METODOLÓGICA	21
OBJETIVO DEL CONTEXTO Y ANÁLISIS	21
<i>Objetivos específicos</i>	21
PROPUESTA FINAL	22
<i>Propuesta específica</i>	22
Capítulo 1	24
LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LOS PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE COBRE	24
1.1. LA ENERGÍA Y LA ACTIVIDAD MINERA	24
1.2. EFICIENCIA ENERGÉTICA: CONCEPTOS Y DEFINICIONES.....	25
1.2.1. <i>Intensidad Energética</i>	25
1.3. IMPORTANCIA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA INDUSTRIA MINERA	25
1.4. PROCESOS DE LA PRODUCCIÓN DEL COBRE: EXTRACCIÓN Y CONCENTRADO	26
Capítulo 2	31
ESTADO DE IMPLEMENTACIÓN DE INICIATIVAS HACIA LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SECTOR MINERO LATINOAMERICANO.	31
2.1. NORMAS Y PROGRAMAS SOBRE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN PERÚ.....	31
2.1.1. <i>Ley de promoción del uso eficiente de la energía, Ley N.º 27345</i>	31
2.1.2. <i>D.S. N.º 053-2007-EM</i>	31
2.1.3. <i>D.S. N.º 034-2008-EM</i>	32
2.1.4. <i>R.M. N.º 469-2009-MEM/DM</i>	32
2.1.5. <i>D.S. 009-2009-MINAM</i>	32
2.1.6. <i>D.S. N.º 004-2016-EM</i>	32
2.1.7. <i>R.M. 0186-2016-MEM/DM</i>	32
2.1.8. <i>D.S. N.º 009-2017-EM</i>	33
2.1.9. <i>D.S. N.º 022-2020-EM</i>	33
2.1.10. <i>Decreto Legislativo N.º 1002</i>	33
2.2. PROGRAMAS Y POLÍTICAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN PAÍSES DE LATINOAMÉRICA	34
2.2.1 ANÁLISIS DE NORMATIVAS, PROGRAMAS Y PLANES DE EE: CASO BRASIL	35
2.2.1.1 <i>Marco Normativo de la Eficiencia Energética</i>	35
2.2.1.2. <i>Plan nacional brasileño de eficiencia energética</i>	35
2.2.2. ANÁLISIS DE NORMATIVAS, PROGRAMAS Y PLANES DE EE: CASO CHILE	36
2.2.2.1. <i>Marco normativo de eficiencia energética</i>	36
2.2.2.2. <i>Ley de eficiencia energética</i>	37
2.2.2.3. <i>Industria y minería</i>	37
2.2.2.4. <i>Programas de Eficiencia Energética</i>	38

2.2.2.5. Plan de Eficiencia Energética	39
2.2.2.6. Consumo de energía de la minería de cobre a nivel nacional.....	40
2.2.2.6.1. Consumos totales de energía en la minería del Cu.....	41
2.2.3. ANÁLISIS DE NORMATIVAS, PROGRAMAS Y PLANES DE EE: CASO COLOMBIA	41
2.2.3.1. Objetivos específicos	42
2.2.3.2. Programas de Eficiencia Energética	42
2.2.3.2.1. Generación de energía	43
2.2.3.2.2. Eficiencia energética en el sector minero-energético	43
2.2.3.2.3. Emisiones fugitivas	44
2.2.3.2.4. Gestión activa de la demanda	44
2.2.4. ANÁLISIS DE NORMATIVAS, PROGRAMAS Y PLANES DE EE: CASO MÉXICO.....	44
2.2.4.1. Marco Normativo de EE.....	45
2.2.4.2. Programas de Eficiencia Energética	46
2.2.4.2.1. Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía 2014-2018 (Pronase) .	46
2.2.4.2.2. FIDE - Programa de Eficiencia Energética	46
2.2.4.2.3. Programa de Apoyo a la Generación Distribuida.....	47
2.2.4.2.4. Financiamiento a proyectos sustentables	47
2.2.4.2.5. Conuee, Programa Nacional de Sistemas de Gestión de la Energía (Pronasgen)	47
2.3. CONCLUSIONES DE LOS PROGRAMAS DE EE DEL SECTOR MINERO EN LATINOAMÉRICA	48
2.4. DESAFÍOS QUE ENFRENTA AMÉRICA LATINA EN CUANTO A LA IMPLEMENTACIÓN DE MEDIDAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SECTOR MINERO.....	49
Capítulo 3	50
Situación actual de la minería del cobre en el Perú	50
3.1.1. <i>Producción minera del sector metálico</i>	50
3.1.1.1. Inversiones del sector minero metálico.....	53
3.1.1.2. Exportaciones del sector minero metálico	54
3.2. PARTICIPACIÓN DE LA MINERÍA EN LA ECONOMÍA DEL PAÍS	54
3.2.1. <i>PBI del sector minero</i>	55
3.2.2. <i>Aporte fiscal de la minería</i>	55
3.2.3. <i>Empleo directo en el sector minero</i>	56
3.3. DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE LAS EMPRESAS MINERAS	57
3.3.1. <i>Plazos de contratación</i>	59
3.3.2. <i>Análisis por zonas del consumo eléctrico de las mineras</i>	60
3.3.2.1. Zona norte	60
3.3.2.2. Zona centro.....	61
3.3.2.3. Zona sur	63
3.3.3. <i>Ventas de energía eléctrica a las empresas mineras</i>	64
3.3.4. <i>Cartera de proyectos mineros a largo plazo</i>	65
3.4. EVALUACIÓN DE LA INTENSIDAD ENERGÉTICA EN LA PRODUCCIÓN DE COBRE DEL PAÍS.....	67
3.5. DESAFÍOS Y BARRERAS PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA MINERÍA DEL COBRE EN EL PERÚ	68
3.5.1. <i>Barreras</i>	69
3.5.1.1. Regulatorias	69
3.5.1.2. Económicas y de mercado	69
3.5.1.3. Políticas e institucionales.....	70
3.5.1.4. Técnicas	71
3.5.1.5. Culturales.....	71
Capítulo 4	72
Acciones para mejorar la eficiencia energética en la minería del cobre en Perú	72
4.1. IMPLEMENTACIÓN DE PROGRAMAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA	72
4.1.1. <i>Implementación del sistema de gestión de la energía ISO 50001 en el sector minero</i>	73
4.1.2. <i>Financiamiento para proyectos en eficiencia energética</i>	73

4.1.3 Impulso de las Compañías de Servicios Energéticos - ESCO	74
4.1.4. Desarrollo de la generación distribuida	75
4.2. INTEGRACIÓN DE FUENTES DE ENERGÍAS RENOVABLES EN LAS OPERACIONES MINERAS	75
4.2.1. Potencial de las energías renovables	75
4.2.2. Energía Eólica	76
4.2.2.1. El Potencial de la energía eólica en el Perú	76
4.2.2. Energía Solar	78
4.2.3. Energía hidroeléctrica	80
4.3. TECNOLOGÍAS Y PRÁCTICAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA APLICABLES A LA PRODUCCIÓN DEL COBRE	85
4.3.1. Buenas prácticas para el uso de energía	85
4.3.2. Implementación del SGE	87
4.3.3. Aporte de las tecnologías innovadoras en la eficiencia energética	88
4.4. DIGITALIZACIÓN PARA UNA MINERÍA 4.0	89
4.5. IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE CONMINUCIÓN	90
4.5.1. Implementación de un sistema de control en circuito de molienda	90
4.5.2. Verificación de eficiencia en subetapas de chancado y de molindas	91
4.5.3. Incorporación de Gearless Mill Drive (GMD)	92
4.5.4. Soluciones de control para molinos SAG	93
4.6. PROYECTOS MINEROS IMPLEMENTADOS	94
4.6.1. Antofagasta Minerals S.A (AMSA)	94
4.6.2. Sociedad Contractual Minera El Abra (SCMEA)	96
4.7. IMPLEMENTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS EN LA MINERÍA PERUANA	98
4.7.1. Proyecto cuprífero Quellaveco	98
4.7.2. Mina Tambomayo	98
4.7.3. Mina Antamina	99
4.8. IMPACTO ECONÓMICO Y AMBIENTAL DE MEJORAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA MINERÍA DEL COBRE EN EL PERÚ	100
Capítulo 5	101
Minerales críticos en la transición de tecnologías de energías limpias	101
5.1. TECNOLOGÍAS DE ENERGÍA LIMPIA REQUIEREN VARIEDAD DE MINERALES Y METALES	106
5.2. EL PAPEL DE LOS MINERALES CRÍTICOS QUE APORTA LA MINERÍA PERUANA A LAS TECNOLOGÍAS DE ENERGÍA LIMPIA	109
5.2.1. Producción minera del cobre (Cu), zinc (Zn), plata (Ag), plomo (Pb), fierro (Fe) y molibdeno (Mb)	109
5.3. CADENA DE EFICIENCIA DEL CICLO DE PRODUCCIÓN DEL MINERAL CONCENTRADO	111
Capítulo 6	113
6.1 METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS	113
6.1.1 CÁLCULO PROYECTADO EN LA PRODUCCIÓN DEL COBRE 2021-2049	114
6.1.2 CÁLCULO DEL CONSUMO DE ENERGÍA PROYECTADO DEL COBRE 2021-2049	115
6.2 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS	120
6.2.1 IMPLEMENTACIÓN DE PROGRAMAS Y MEJORAS TECNOLÓGICAS PARA LA PRODUCCIÓN DE CONCENTRADO DE COBRE	121
6.2.1.1 Implementación del sistema de gestión de la energía (SGE)	121
6.2.1.2 Implementación de mejoras tecnológicas por etapas	125
6.2.1.2.1. Recambio y control del proceso	125
6.2.1.2.2. Nuevas Tecnologías	125
6.2.1.3. Ingreso de las RER y sus efectos en la reducción de gases	129
6.3. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS	132
6.3.1. Proyección de la producción anual del concentrado de cobre 2021-2049	132

6.3.2. Proyección BAU del consumo de energía proyectado para la producción anual del cobre 2021-2049	133
6.3.3. Emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) asociados 2021-2049	134
6.3.4. Proyección del consumo de energía en la producción del cobre bajo implementación de gestión y mejoras tecnológicas.....	135
6.3.4.1 Mediante la implementación del Sistema de Gestión de la Energía (SGE)	135
6.3.4.2. Mediante la Implementación mejoras tecnológicas por etapas	136
6.3.4.3 Impacto positivo de la minería sobre la reducción de emisión de gases 2021-2049	137
6.3.4.3.1. Mediante SGE	137
6.3.4.3.2. Mediante Implementación de mejoras tecnológicas por etapas	137
6.3.5. Cálculo y análisis del comportamiento de la intensidad energética en la producción del concentrado del cobre	138
6.3.5.1. Implementando políticas energéticas SGE y mejoras tecnológicas por etapas para la reducción del indicador de intensidad energética	139
6.3.5.1.1. Evaluación y comparación de la intensidad energética MWh/T.....	139
6.3.5.1.2. Evaluación y comparación de la intensidad de emisiones de CO ₂ eq/T	141
6.3.5.2. Implementando políticas energéticas SGE y mejoras tecnológicas por etapas adicionalmente incorporando fuentes de energía no convencionales.....	142
6.3.5.3. Evaluación del comportamiento de la intensidad energética por tecnología adoptada	144
6.3.5.3.1. Iluminación	144
6.3.5.3.2. Alta eficiencia de motores eléctricos.....	145
6.3.5.3.3. Implementación en equipos de chancado y molienda	146
Conclusiones	148
Recomendaciones	151
Bibliografía.....	152
Catálogo de sitios web.....	156
Anexos	158
ANEXO 1. ESTIMACIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA NETA DE ELECTRICIDAD DEL SECTOR MINERO Y LA EMISIÓN DE CO ₂ , AÑO 2019.	158
ANEXO 2. CÓDIGO EN PROGRAMA PYTHON DEL MODELO DE REGRESIÓN DE LA PRODUCCIÓN EN LA PROYECCIÓN DEL COBRE.	160
ANEXO 3. CÁLCULO DE AHORRO DE ENERGÍA Y REDUCCIÓN DE EMISIONES, CON LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA (SGE)	164
ANEXO 4. CÁLCULO DE AHORRO DE ENERGÍA CON LA IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS TECNOLÓGICAS	167
ANEXO 5. CÁLCULO PARA HALLAR EL INDICADOR DE INTENSIDAD ENERGÉTICA IMPLEMENTANDO SGE.....	171
ANEXO 6. CÁLCULO PARA HALLAR EL INDICADOR ENERGÉTICO DE INTENSIDAD CON LA IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS TECNOLÓGICAS	175
ANEXO 7. CÁLCULO PARA HALLAR LA INTENSIDAD DE LA EMISIÓN DE GASES CO ₂ IMPLEMENTANDO SGE	179
ANEXO 8. CÁLCULO PARA HALLAR LA INTENSIDAD DE EMISIONES DE GASES CO ₂ CON LA IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS TECNOLÓGICAS	183
ANEXO 9. CÁLCULO PARA HALLAR LA INTENSIDAD DE LA EMISIÓN DE GASES CO ₂ IMPLEMENTANDO SGE Y FUENTES DE RECURSOS DE ENERGÍAS RENOVABLES (RER).....	187
ANEXO 10. CÁLCULO PARA HALLAR LA INTENSIDAD DE EMISIONES DE GASES CO ₂ CON LA IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS TECNOLÓGICAS Y FUENTES RER.....	191
ANEXO 11. EMPRESA MINERA CON CERTIFICACIÓN ISO 50001	194
ANEXO 12. INVENTARIO NACIONAL DE GEI DE EMISIONES ANTROPOGÉNICAS POR FUENTES Y REMOCIONES POR SUMIDEROS DE TODOS LOS GEI, AÑO 2016.....	195

Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Diagrama de flujo de chancado y molienda.....	28
Ilustración 2. Uso de energías en el sector minero.....	29
Ilustración 3. Distribución del consumo eléctrico en los diversos procesos	30
Ilustración 4. Normas publicadas sobre eficiencia energética.	34
Ilustración 5. Resultados de consumo energético para la producción del cobre.....	41
Ilustración 6. Inversión minera 2011-2021 (ver Anexo 8)	53
Ilustración 7. Exportaciones mineras 2011-2021 (ver Anexo 7).....	54
Ilustración 8. PBI minero metálico 2019	55
Ilustración 9. Participación de la minería en los aportes fiscales	56
Ilustración 10. Evolución del empleo 2011-2021	57
Ilustración 11. Proyección de la potencia hidroeléctrica	82
Ilustración 12. Rango de aumento de rendimiento alcanzado con diferentes modelos de control para el proceso de molienda	91
Ilustración 13. Minerales críticos usados en tecnologías de energía limpia.....	101
Ilustración 14. Minerales utilizados en tecnologías de energía limpia en comparación de otras fuentes de generación de energía.....	102
Ilustración 15. Flujo de la producción de concentrado de cobre y zinc	111
Ilustración 16. Indicador energético de la intensidad vs. ley del cobre	116
Ilustración 17. Indicador de emisiones vs. ley de cobre.....	120
Ilustración 18. Tendencias del crecimiento en la producción anual cobre 2021-2028 (elaboración propia).....	132
Ilustración 19. Tendencias del crecimiento en la producción anual cobre 2021-2049 (elaboración propia).....	133
Ilustración 20. Consumo de la energía proyectada 2021-2028 (elaboración propia).....	134
Ilustración 21. Consumo de la energía proyectada 2021-2049 (elaboración propia).....	134
Ilustración 22. Emisión de gases de efecto invernadero (GEI) proyectado 2021-2049 (elaboración propia).....	135
Ilustración 23. Implementación tecnológica y ahorro total de energía con SGE	136
Ilustración 24. Implementación de mejoras tecnológicas por etapas para el ahorro total de energía (elaboración propia, ver desarrollo en anexo 4).....	136
Ilustración 25. Reducción de emisiones de CO ₂ eq con SGE (elaboración propia, ver desarrollo en anexo 3)	137
Ilustración 26. Reducción de emisiones de CO ₂ eq con mejoras tecnológicas por etapas (elaboración propia, ver desarrollo anexo 4)	138
Ilustración 27. Diagrama de flujo para calcular el índice de intensidad energética ..	139
Ilustración 28. Reducción de la intensidad energética con SGE (elaboración propia, desarrollo de los datos de intensidad, descripción de solución en anexo 5).....	140
Ilustración 29. Reducción de la intensidad energética con mejoras tecnológicas (elaboración propia, desarrollo de los datos de intensidad, descripción de solución en anexo 6).....	140
Ilustración 30. Reducción de la Intensidad de emisiones de CO ₂ con SGE (elaboración propia, desarrollo de los datos de intensidad, descripción de solución en anexo 7).....	141

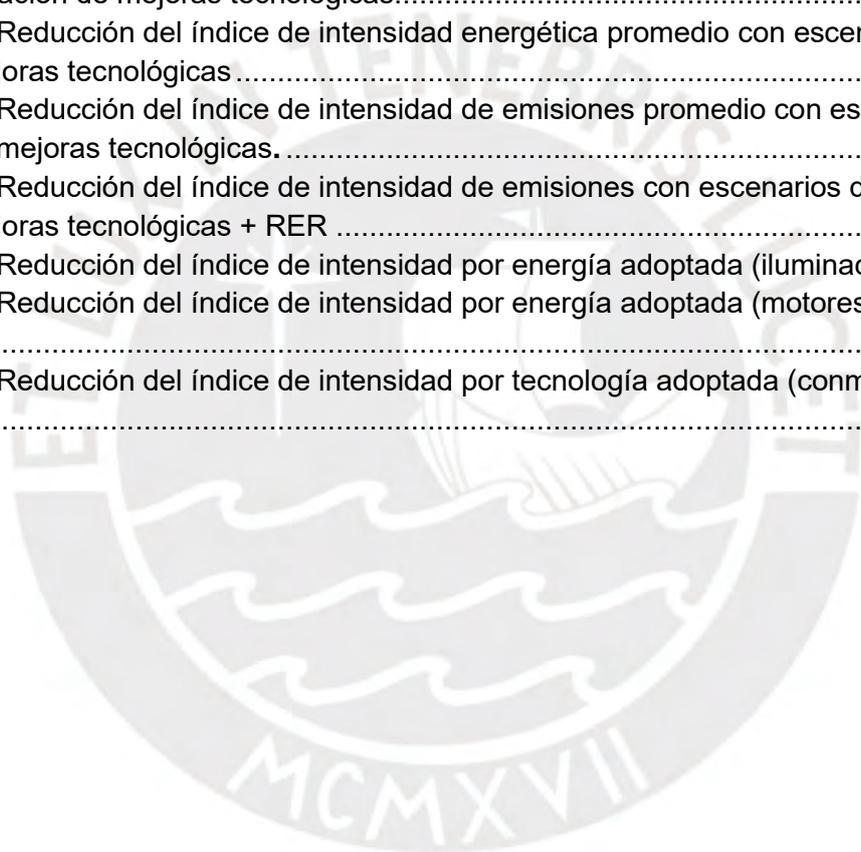
Ilustración 31. Reducción de la intensidad de emisiones de CO ₂ con mejoras tecnológicas (elaboración propia, desarrollo de los datos de intensidad, descripción de solución en anexo 8).....	142
Ilustración 32. Reducción de la intensidad de emisiones de CO ₂ con SGE y RER (elaboración propia, desarrollo de los datos de intensidad, descripción de solución en anexo 9).....	143
Ilustración 33. Reducción de la intensidad de emisiones CO ₂ con mejoras tecnológicas y RER (elaboración propia, desarrollo de los datos de intensidad, descripción de solución anexo en 10)	143
Ilustración 34. Reducción de la intensidad energética con mejoras en iluminación (elaboración propia).....	145
Ilustración 35. Reducción de la intensidad energética con motores eficientes (elaboración propia).....	146
Ilustración 36. Reducción de la intensidad energética con mejoras tecnológicas en conminución (elaboración propia)	147



Lista de tablas

Tabla 1. Programas de EE de la Agencia Chilena de EE	38
Tabla 2. Corto plazo (iniciativas a implementar el 2020).....	39
Tabla 3. Mediano plazo (iniciativas a implementar el 2020-2021).....	40
Tabla 4. Largo plazo (iniciativas a implementar a partir 2022).....	40
Tabla 5. Programas de EE relacionados al sector minero en Latinoamérica	48
Tabla 6. <i>Producción minera del sector metálico</i>	51
Tabla 7. <i>Ranking mundial y regional en producción minera, año 2019</i>	52
Tabla 8. Potencia contratada por mineras	58
Tabla 9. Ventas de energía eléctrica por empresa minera a marzo 2019	58
Tabla 10. Contratos con clientes libres sector minería 2019.....	59
Tabla 11. Demanda de potencia y energía, 2019	60
Tabla 12. Empresas suministradoras de energía para la actividad minera	61
Tabla 13. Demanda de potencia y energía centro, 2019	62
Tabla 14. Demanda de potencia y energía sur, 2019	63
Tabla 15. Precio medio de mercado libre por empresa minera a enero del año 2020.	64
Tabla 16. Cartera de proyectos mineros de cobre	66
Tabla 17. Valores referenciales para la evaluación de la intensidad energética	67
Tabla 18. Tabla sintetizadora de los programas de EE en Latinoamérica.....	72
Tabla 19. Potencial de las energías renovables	76
Tabla 20. Centrales Eólicas Interconectados al SEIN.....	77
Tabla 21. Estudio del Senamhi sobre energía solar	79
Tabla 22. Centrales solares interconectadas al SEIN	79
Tabla 23. Potencial (P) hidroeléctrico técnico del Perú.....	81
Tabla 24. Centrales hidroeléctricas, subasta RER, con interconexión al SEIN	82
Tabla 25. Empresas mineras con generación hidroeléctrica propia de RER.....	83
Tabla 26. Motores mejoras energéticas y potenciales ahorros de energía	86
Tabla 27. Bombas con mejoras energéticas y potenciales ahorros de energía.....	87
Tabla 28. Consumo de energía por subetapas de chancado y de molienda.....	92
Tabla 29. Áreas de mayor consumo energético de la empresa con referencia a la electricidad	94
Tabla 30. Minera Los Pelambres, iniciativas implementadas desde el año 2017.....	95
Tabla 31. Minera Centinela, iniciativas implementadas desde el 2018	95
Tabla 32. Minera Antucoya, iniciativas implementadas desde el año 2018.....	95
Tabla 33. Iniciativa de gestión energética SCMEA	96
Tabla 34. Minera El Abra, iniciativas implementadas.....	97
Tabla 35. Necesidad crítica de minerales para tecnologías de energías limpias	106
Tabla 36. Demanda de minerales según escenarios STEP y SDS	107
Tabla 37. Producción de minerales concentrados 2020	110
Tabla 38. Valores históricos de producción, energía eléctrica consumida e inversión	113
Tabla 39. Inversión, crecimiento y producción proyectados del cobre	114
Tabla 40. Promedio de la ley del cobre y de la energía consumida	117
Tabla 41. Consumo de la energía proyectada del cobre.....	117
Tabla 42. Factor de emisión (FE) de los GEI asociados a la producción de las fuentes primarias del SEIN 2021-2049	118

Tabla 43. Proyección de la emisión de alcance 2 de los gases CO ₂	118
Tabla 44. Implementación con escenario SGE.....	122
Tabla 45. Potencial objetivo con escenario SGE.....	122
Tabla 46. Potencial objetivo con escenario SGE y RER.....	122
Tabla 47. Resultados del ahorro de energía y reducción de emisiones con la implementación del SGE.....	123
Tabla 48. Implementación con escenario de mejoras tecnológicas.....	125
Tabla 49. Potencial objetivo con luminarias led.....	126
Tabla 50. Potencial objetivo con mejora de motores.....	126
Tabla 51. Potencial objetivo con mejoras en la conminución.....	126
Tabla 52. Resultados del ahorro de energía con la implementación de mejoras tecnológicas.....	127
Tabla 53. Resultados de la reducción de la emisión de gases CO ₂ eq con la implementación de mejoras tecnológicas.....	130
Tabla 54. Reducción del índice de intensidad energética promedio con escenarios de SGE y Mejoras tecnológicas.....	139
Tabla 55. Reducción del índice de intensidad de emisiones promedio con escenarios de SGE y mejoras tecnológicas.....	141
Tabla 56. Reducción del índice de intensidad de emisiones con escenarios de SGE + RER y Mejoras tecnológicas + RER.....	142
Tabla 57. Reducción del índice de intensidad por energía adoptada (iluminación)...	144
Tabla 58. Reducción del índice de intensidad por energía adoptada (motores eficientes).....	145
Tabla 59. Reducción del índice de intensidad por tecnología adoptada (conminución).....	147



Glosario de términos

A

APEC: Cooperación Económica Asia-Pacífico.

AL: América latina.

ANA: Autoridad nacional del agua.

B

BNE: Balance nacional de la energía.

BTU: British Thermal Unit, cantidad de energía utilizada en un proceso.

BAU: Business as usual.

C

CMNUCC: Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático.

CNUMAD: Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y Desarrollo.

COP: Conferencia de las Partes, órgano supremo de la CMNUCC.

Creara: Empresa encargada del estudio de barreras de eficiencia energética en el Perú.

CND: Contribuciones nacionalmente determinadas.

COES: Comité de Operación Económica del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional.

Capex: Gastos en capital.

CO₂: Dióxido de carbono.

CH: Centrales hidroeléctricas.

D

DGEE: Dirección general de eficiencia energética.

DS: Decreto supremo.

SO₂: Dióxido de azufre.

E

EE: Eficiencia energética.

ESCO: Energy Service Companies, empresas de ingeniería especializadas en la conservación de energía.

EEE: Etiquetado de eficiencia energética

F

FISE: Fondo de Inclusión Social Energético.

FOSE: Fondo de Compensación Social Eléctrica.

FODA: Herramienta de estudio de la situación de una empresa.

FNEE: Fondo nacional de eficiencia energética

G

GIZ: Sociedad Alemana de Cooperación Internacional.

GEI: Gases de efecto invernadero.

GtCO₂: Gigatoneladas de dióxido de carbono.

GWh: Gigavatio-hora.

I

IRENA: Agencia Internacional de Energías Renovables.

INEI: Instituto Nacional de Estadística e Informática.

ISO: International Organization for Standardization.

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change.

IEA: Agencia internacional de la energía

L

LED: Diodo emisor de luz.

LMCC: Ley Marco del Calentamiento Global en Perú.

M

Minem: Ministerio de Energía y Minas.

MtCO₂eq: Mega toneladas de dióxido de carbono equivalente.

MVR: Monitoreo, verificación y reporte.

MW: Megavatio

N

N₂O: Óxido nitroso.

NDC: Contribuciones nacionalmente determinadas.

O

ONU: Organización de las Naciones Unidas.

ODS: Objetivos de desarrollo sostenible.

Osinergmin: Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería.

Opex: Gastos operativos.

OCDE: Organización para la cooperación y el desarrollo económico.

P

PAE: Proyecto de ahorro energético.

PBI: Producto Bruto Interno.

PNEE: Plan Nacional de Eficiencia Energética.

PPEE: Programa País de Eficiencia Energética.

Pronase: Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía.

Proure: Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía y Demás Formas de Energía No Convencionales, Colombia.

Pymes: Pequeñas y medianas empresas.

PGM: Minerales del grupo de platino

R

RM: Resolución ministerial.

RER: Recursos energéticos renovables.

REE: Minerales de tierras raras.

S

SO₂: Dióxido de azufre.

SEIN: Sistema eléctrico interconectado.

STEPS: Escenario de políticas declaradas.

SDS: Escenario de desarrollo sostenible.

SGE: Sistema de gestión de la energía.

T

TMF: Toneladas métricas finas.

U

UIT: Unidad impositiva tributaria.

UEE: Uso eficiente de la energía.



Introducción

En el mundo ha habido periodos de grandes transformaciones sociales y evolución global económica como la Revolución Industrial, que incorporó cambios sin precedentes con tecnologías para la masificación de productos en serie; luego, el surgimiento del capitalismo, con un nuevo orden económico y comercial. En la actualidad, es la globalización económica, resultado de la innovación humana, el progreso tecnológico que nos acerca a la era de la inteligencia artificial (IA). Todos son cambios estructurales trascendentales, los cuales se deben tomar con la mayor importancia a nivel global, y uno de estos es, sin lugar a duda, el bienestar del medio ambiente. Las economías globales se hacen más intensivas, el consumo diversificado de los mercados mundiales ejerce una mayor presión en la producción de bienes manufacturados; por tanto, la demanda de energía en la industria global es inescapable. Como primera respuesta a estos requerimientos, se incorporó la masificación de combustibles derivados de restos fósiles no renovables (petróleo, carbón y gas) en la matriz energética primaria y, paralelo a este crecimiento energético, se elevaron las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), los cuales ocasionan daños irreversibles a los diferentes ecosistemas.

La COP21 ha establecido que los países deberán presentar compromisos para la reducción de emisiones frente a la emergencia climática; por tanto, la comunidad mundial, así como cada nación por decisión propia, se comprometió con la elaboración de los objetivos de desarrollo sustentable (ODS) implementados por la Naciones Unidas. El Perú, como parte de estos acuerdos, se comprometió a reducir sus emisiones de carbono en un 40 % para el período de 2020-2030. Se integraron en la legislación del Estado peruano normativas y reglamentos relativos al uso prudente y eficiente de la energía por parte de las instituciones públicas, el sector industrial y el público en general.

La industria minera del Perú juega un rol muy importante en América Latina y a nivel mundial, ya que los productos de esta actividad son muy representativos en el ranking mundial de exportaciones de minerales polimetálicos como el cobre (Cu), el oro (Au), el zinc (Zn), la plata (Ag) y el plomo (Pb) y, además, tienen objetivos comerciales como la atención de la demanda del mercado mundial de metales. En el Perú, la minería es una actividad esencial para el desarrollo económico y social con aportaciones al erario nacional como el PBI minero metálico, el cual en promedio es de 9,26 % (2015-2019), con exportaciones de cerca del 60 % del total de las exportaciones en los últimos años, aportes fiscales de 8,1 % (2019) y empleos directos de 209 440 (2018). Por otra parte, su consumo energético fue de 32,8 % del SEIN (2019) y, asimismo, tiene en

cartera (2018-2028) a corto, mediano y largo plazo 46 proyectos mineros con una inversión global de más de 59 mil millones USD, en su mayoría para la explotación del cobre (71 % del total). Además, su proyección adicional vegetativa de la demanda eléctrica al 2028 será de 16,245 GWh (un aumento del 53 % respecto a 2018) y la demanda del sector minero por entrada de 19 proyectos al 2028 sería de 9,462 GWh adicionales (un aumento del 61 % respecto al 2019).

Por ser una actividad intenso-energética cada vez mayor, es necesario lograr la eficiencia energética en este sector. Por una parte, se reducirían los consumos energéticos y los costos asociados a estos, e incrementaría la producción; por otra parte, se reduciría el impacto ambiental, al minimizar la emisión de CO₂ (acción contra el cambio climático global, ODS 13). Las condiciones de desafío en innovación, o también denominado minería 4.0 para la industria minera local, están dadas en elevar los niveles de modernización, con nuevas tecnologías como la digitalización de los procesos mineros, acompañadas de políticas y programas gubernamentales referentes a la eficiencia energética; institucionalizar responsabilidades e incentivos que involucren a este sector para afianzar la sustentabilidad energética y poder cumplir con los compromisos del Perú en la COP21.

Cabe mencionar a la transformación digital que está impulsando el sector minero, que hoy en día busca convertir sus principales operaciones en predictivas con integración de datos, lo cual optimizaría los costos y la seguridad en sus operaciones. Además, sin dejar de resaltar los beneficios que se van a incorporar en el ámbito del medio ambiente. De estas innovaciones podemos destacar tecnologías como inteligencia artificial, internet de las cosas, gemelos digitales, solución en la nube y *big data*.

La demanda mundial de energía en el 2050 será aproximadamente el 8 % menor que la actual, cuya economía será del doble de grande y con una población mayor al de hoy en 2 mil millones de personas. Por tanto, cada unidad de la energía tendrá que lograr más de lo que hoy produce. (IEA, 2021b).

Explorar contextos y definir ámbitos de impacto sobre la investigación

El Perú es uno de los principales productores de cobre a nivel mundial, y la minería es una industria clave para la economía del país. La producción del cobre en la gran minería es un proceso intenso, por lo que el consumo de la energía eléctrica es vital. El alto consumo de la energía eléctrica produce costos para las empresas mineras, lo cual puede afectar su rentabilidad y competitividad.

La eficiencia energética en la producción del cobre es un aspecto importante para promover la sostenibilidad de la industria minera. Las empresas mineras están cada vez más comprometidas a prácticas responsables y disminuir la huella ambiental. La adecuada implementación de la eficiencia energética puede tener un impacto significativo en la industria minera. La reducción del consumo de la electricidad puede generar ahorros significativos en los costos operativos, aumentar la competitividad de las empresas y tener una gestión financiera más eficiente.

La mejora de la eficiencia energética en la producción del cobre requiere el desarrollo y la adopción de tecnologías y prácticas adecuadas. Esto puede invocar a la transferencia de conocimientos de los diferentes actores, estas pueden venir de empresas mineras, proveedoras de tecnologías, instituciones académicas y entidades gubernamentales.

El sector minero en el Perú está sujeta a regulaciones ambientales cada vez más estrictas. La eficiencia energética puede ser una estrategia para reducir los gases de efecto invernadero y por tanto minimizar el impacto ambiental sobre el medio ambiente en la producción del cobre.

Descripción del problema

La descripción del problema de esta investigación surge en un contexto marcado por diversos desafíos que impactan significativamente la industria minera a nivel global. En primera instancia, la pandemia de COVID-19 ocasionó una serie de efectos negativos y de gran envergadura en la economía mundial, donde la industria minera resultó especialmente afectada. Las interrupciones y complicaciones en la cadena de suministro, los cierres de minas y las limitaciones en la movilidad de las mismas generaron una menor producción y una mayor volatilidad en los precios de los minerales. Además, se enfrenta a la escasez de minerales críticos como el cobre, el zinc y la plata. Estos minerales son fundamentales en numerosas industrias, incluyendo la electrónica, la energía renovable, la fabricación de vehículos eléctricos y las tecnologías de la información y comunicación. La creciente demanda de estos minerales, combinada con la limitada disponibilidad de yacimientos de alta ley, ha generado preocupaciones sobre la seguridad del suministro a largo plazo.

Disminuir la dependencia hacia los combustibles fósiles y aplacar el cambio climático en el sector de la producción de electricidad exige una rápida transición a las fuentes de energía renovables. Sin embargo, la industria minera enfrenta el desafío de mejorar la intensidad energética eléctrica en sus operaciones para lograr una producción más eficiente y sostenible. El término 'intensidad energética' describe cuánta energía se

necesita para fabricar una sola unidad de un producto, en este caso, de minerales metálicos. Es crucial reducir la intensidad energética eléctrica en la industria minera para mejorar su sostenibilidad y disminuir su impacto ambiental. Para extraer, procesar y transportar minerales, la industria minera utiliza grandes cantidades de electricidad; por ello, hacer uso óptimo de la electricidad resulta crucial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y otros agentes de contaminación asociados.

Adicionalmente, se ha observado la disrupción de nuevas tecnologías en la producción del mineral. Las operaciones de extracción, procesamiento y transporte de minerales se han transformado por completo gracias a la incorporación de adelantos tecnológicos como la inteligencia artificial, la automatización, la robótica y la utilización de datos masivos (big data). Aunque existen obstáculos relacionados con la adaptación y aplicación de estos avances en una industria históricamente conservadora, estas nuevas tecnologías también encierran la promesa de aumentar la eficiencia, la seguridad y la sostenibilidad de las actividades mineras.

Propuesta metodológica

Para el análisis de nuestro trabajo de investigación sobre la eficiencia energética en la proyección de la producción del concentrado de cobre, se empleará la metodología observacional cuantitativa. La cual se basa en datos históricos de la producción del concentrado de cobre y el consumo de energía eléctrica para dicho proceso, datos confiables de la inversión en la cartera de proyectos mineros en corto, mediano y largo plazo, la comparación y adopción de tecnologías y buenas prácticas usadas en diferentes minas.

Objetivo del contexto y análisis

El objetivo general de esta investigación es abordar los problemas específicos relacionados con la intensidad energética en el sector minero del Perú mediante la identificación de soluciones y estrategias que permitan mejorar la eficiencia energética. El estudio se centrará en la implementación de medidas de eficiencia energética, como la inserción de programas y prácticas para afianzar la sostenibilidad en el sector minero cuprífero.

Objetivos específicos

1. Evaluar el consumo actual de energía eléctrica en las operaciones mineras del Perú, identificando los principales puntos de ineficiencia energética y los factores que contribuyen a la alta intensidad energética en el proceso de extracción y producción de minerales.

2. Diseñar un plan integral de eficiencia energética para la industria minera, considerando la implementación de tecnologías avanzadas, mejores prácticas operativas y el uso eficiente de recursos en las diferentes etapas del ciclo minero.

3. Investigar y proponer la integración de fuentes de energías renovables en las operaciones mineras del Perú, analizando su viabilidad técnica y económica, así como las barreras y oportunidades para su adopción a gran escala.

4. Desarrollar estrategias de capacitación y concienciación para promover una cultura de eficiencia energética en el sector minero, involucrando a todos los niveles de la industria y fomentando la participación de los trabajadores en la implementación de medidas sostenibles.

5. Evaluar el desarrollo de la inserción de programas de eficiencia energética aplicados al sector minero metálico en el Perú.

Propuesta final

La implementación de un plan integral de eficiencia energética, que incluye la adopción de tecnologías avanzadas, la promoción de una cultura de eficiencia, el uso de fuentes de energías renovables y la evaluación del desarrollo de programas de eficiencia energética en el Sector Minero Metálico en el Perú permitirá reducir significativamente la intensidad energética en las operaciones mineras y afianzar la sostenibilidad de la industria.

Propuesta específica

1. La recopilación de data histórica anual de las propiedades del mineral, de la producción y de la intensidad energética empleada para producir cobre concentrado permitirá establecer un marco de referencia para evaluar la efectividad del plan de eficiencia energética y medir los resultados logrados en términos de reducción de la intensidad energética.

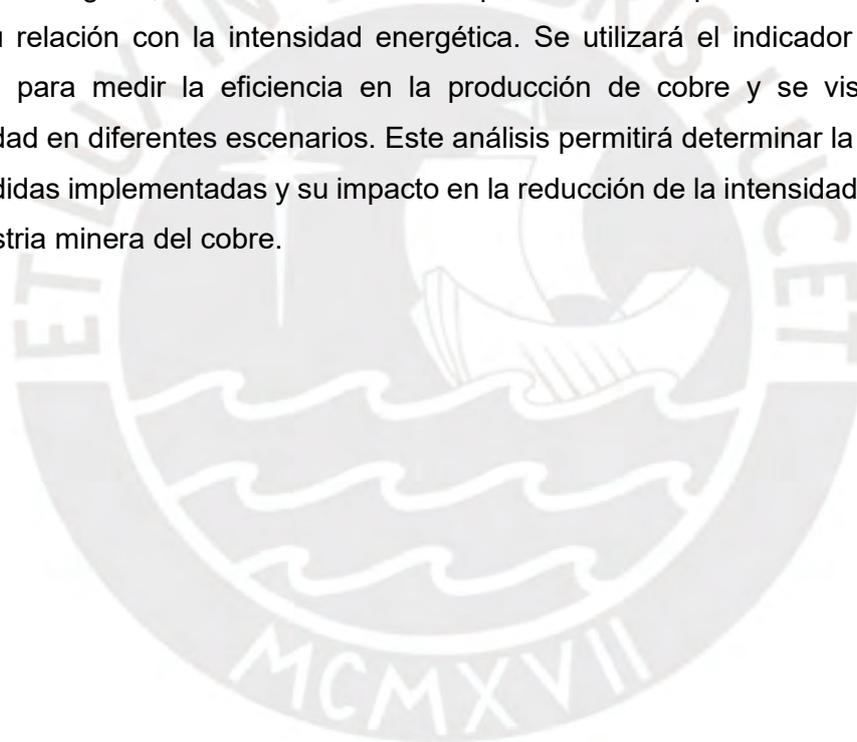
2. La evaluación del desarrollo de Programas de Eficiencia Energética aplicados al sector cuprífero en América Latina proporcionará información valiosa para identificar prácticas exitosas y oportunidades de mejora que contribuyan a la reducción de la intensidad energética en las operaciones mineras.

3. La información de la situación actual de la minería del cobre en el Perú será relevante sobre el rol que representa la minería en la economía del país, la demanda de la energía eléctrica del sector minero cuprífero, la formulación de la evaluación del indicador de energía como la intensidad energética y, finalmente, las barreras y desafíos relevantes de este sector.

4. La implementación de un plan integral de eficiencia energética en el sector minero de la producción de cobre, que incluya la adopción de tecnologías avanzadas, el uso de fuentes de energías renovables y la promoción de una cultura de eficiencia; permitirá reducir significativamente la intensidad energética en las operaciones mineras y afianzar la sostenibilidad de la industria.

5. La evaluación de la eficiencia energética en la producción de minerales estratégicos o críticos en la cadena de suministro de materias primas para la transición energética permitirá identificar oportunidades para reducir la intensidad energética en las operaciones mineras. Además, se analizará el papel de la minería peruana en la satisfacción de la creciente demanda global de nuevas tecnologías y su contribución a la transición hacia fuentes de energía más sostenibles.

6. Mediante el análisis de datos históricos y la implementación de programas y cambios tecnológicos, se buscará identificar patrones en la producción de cobre y evaluar su relación con la intensidad energética. Se utilizará el indicador energético MWh/TMF para medir la eficiencia en la producción de cobre y se visualizará la productividad en diferentes escenarios. Este análisis permitirá determinar la efectividad de las medidas implementadas y su impacto en la reducción de la intensidad energética en la industria minera del cobre.



Capítulo 1

La eficiencia energética en los procesos de producción de cobre

La energía es vital para el desarrollo de la industria global. Por nuestro contexto, priorizaremos hablar sobre la energía eléctrica, ya que es un recurso energético dinámico para alimentar una diversidad de equipos eléctricos, iluminación, climatización, electromovilidad, etc. Con la extensión de la industria y el progreso económico global, el impacto del consumo de la energía eléctrica se ha intensificado.

La mayor parte de la energía utilizada en la industria procede de combustibles fósiles, tales como el carbón, el petróleo y el gas natural.

Algunos datos que puntualizan la importancia de la energía eléctrica:

- a. Según la Agencia Internacional de Energía (IEA), la demanda mundial de la industria es cerca del 40 % del consumo total de electricidad.
- b. El consumo de la industria ha aumentado más del doble respecto a 1990, según la IEA.
- c. En algunos países como EE. UU. y China, el consumo de la electricidad en la industria ha superado en creces a los consumos residencial y comercial juntos.

1.1. La energía y la actividad minera

La energía en la industria minera es fundamental. En el sector minero metálico, el consumo de la energía eléctrica es muy intensivo; generalmente, la energía se usa para alimentar maquinarias y equipos pesados, ventilar, iluminar y para los procesos de la refinación de los minerales. Mostramos algunos datos globales para cuantificar la importancia de la energía en esta industria:

- a. El sector de la minería consume, en el mundo, aproximadamente el 11 % del consumo total de electricidad, según datos de la IEA.
- b. La energía eléctrica en el sector minero representa entre el 15 % y el 40 % de los costos totales de producción, según la OCDE.
- c. Es probable que el crecimiento del sector de la minería metálica en los países en desarrollo y la necesidad de metales en la economía mundial impulsen la demanda de electricidad en un futuro cercano.

Dada la importancia de adoptar tecnologías eficientes y optimizar los procedimientos para ahorrar energía, la eficiencia energética es una cuestión crucial

para el desarrollo del sector, pues estas tendrán un gran efecto en la rentabilidad y competitividad de las organizaciones y las empresas.

1.2. Eficiencia Energética: conceptos y definiciones

La eficiencia energética se puede definir como la energía que se usa en la industria para la producción de un bien de tal forma que el consumo de esta sea lo menor posible, sin afectar el volumen de la producción establecida.

Por tanto, la eficiencia energética en el sector industrial desempeña un papel importante en la interacción del bien producido con la energía empleada. Busca que, dentro de los procesos y la cadena de producción, el consumo de la energía se reduzca considerablemente sin que el volumen del bien sea afectado, de tal forma le da mayor sostenibilidad al uso de la energía y un menor impacto ambiental.

1.2.1. Intensidad Energética

Un indicador clave para evaluar la eficiencia energética es la intensidad energética, que cuantifica la correlación entre la capacidad de fabricación y producción de un bien determinado y su consumo de energía. En el caso específico de nuestra investigación, nos centraremos en la cadena de producción de energía eléctrica y la intensidad energética será considerada como la relación entre la producción de electricidad y los insumos necesarios para su generación.

Este enfoque nos permitirá evaluar con precisión la eficiencia de la producción de energía eléctrica y su relación con los recursos utilizados en el proceso. Al comprender y mejorar la intensidad energética en el contexto minero, podremos encontrar estrategias que contribuyan a la reducción del consumo de energía y, al mismo tiempo, mejoren la sostenibilidad y competitividad de la producción de minerales metálicos en el Perú como exportador de concentrados.

1.3. Importancia de la eficiencia energética en la industria minera

El rol de la eficiencia energética en la industria minera es fundamental; dado que, en los procesos para la producción de los minerales, el volumen del consumo de energía es muy intensivo, de tal forma que la energía es uno de los gastos primordiales que tiene la industria minera. Mejorar el consumo de la energía ayudaría a bajar los costos operativos y, por lo tanto, mejoraría la rentabilidad de sus operaciones.

La industria minera emite grandes cantidades de dióxido de carbono al ambiente, debido a la alta demanda de energía en la producción de los minerales y a la utilización de fuentes primarias de recursos no renovables para su producción. Por esta razón, la eficiencia energética en este sector juega un rol importante. Al lograr reducir el consumo de energía en la cadena de producción, se conseguiría una mengua de las emisiones de dióxido de carbono, lo que provocaría que los procesos mineros sean más sustentables en el medio ambiente.

1.4. Procesos de la producción del cobre: extracción y concentrado

La actividad industrial de la minería metálica consiste en la extracción o explotación de minerales que se han agrupado como depósitos en el suelo y el subsuelo. La plata, el plomo, el cobre, el hierro, el oro, el zinc, el estaño, el molibdeno, el cadmio y el wolframio son los productos mineros más importantes de los Andes, lugar donde se encuentra la mayoría de las minas peruanas. Estos elementos se aprovechan como materias primas básicas para la producción de una amplia gama de productos industriales.

La extracción del mineral y la concentración de la carga metálica constituyen la base inicial del proceso de producción minera. Posterior a ambas fases, se realiza el procedimiento de purificación final para la obtención del metal deseado, en lugares separados y apartados de la mina. Existen dos formas de explotación minera: a tajo abierto y subterránea, las cuales varían en función de la ubicación del mineral.

a. La minería subterránea se emplea cuando se descubre que las vetas de metal son profundas y finas; en consecuencia, deben perforarse socavones y túneles para facilitar la extracción de estas vetas metálicas. Cabe recalcar que estos procesos se basan en evaluaciones previas, tanto a nivel técnico como económico.

Investigación: Esta actividad suele establecer las magnitudes, las características mineralógicas, la posición, las reservas y el coste del yacimiento minero.

b. En los yacimientos masivos de la región se utiliza la técnica de extracción de grandes volúmenes conocida como minería a tajo abierto. Esta se basa en extraer todo el material de la zona donde se encuentra el mineral y está pensada para yacimientos con mineral disperso. Suele requerir el traslado de enormes cantidades de mineral.

Este proceso de explotación minera se basa en los siguientes procedimientos: (i) el mineral que posee contenido metálico económicamente explotable se traslada a la chancadora del tajo abierto; (ii) El *leach* o material de baja ley se almacena en botaderos especiales para después ser lixiviado y recobrar su contenido metálico; (iii) el desmonte, producto estéril y sin valor económico, se envía a los botaderos. Por otro lado, el

transporte de este se realiza a través de los siguientes medios: (i) en camiones volquetes, a partir de los cúmulos o bancos hasta los botaderos; (ii) en vagones de tren o coches sobre rieles, a partir de los bancos a la chancadora o botaderos de *leach* o desmonte; (iii) transporte combinado, volquete a ferrocarril por medio de embarcaderos denominados *docks* o *hoppers*.

Cabe mencionar que no se permite la venta directa de mineral extraído con bajo contenido en metal (de baja ley). Para estar listo para los procedimientos de fundición y refinado de la cadena de valor, necesita pasar por un proceso para aumentar su contenido de metal.

Concentración: Es un método de enriquecimiento de minerales específicos, como el sulfuro de cobre, el plomo o el zinc, los cuales contienen oro y plata, mientras que el material libre se desecha. La recepción de los materiales, la trituración, la molienda, la flotación y el secado de los concentrados son las operaciones que componen la concentración.

Se obtienen concentrados de cobre, plomo, zinc, etc., en función del tipo de mineral que se procese; por ejemplo, concentrados a granel que comprenden pares de metales (plomo/cobre, plomo/zinc o zinc/cobre). Además, se pueden producir concentrados de plata y oro, siempre que lo permitan las características del mineral. Estos son los procesos usuales que conducen a la concentración:¹

a. Recepción de minerales: antes de ser triturado, el mineral de la mina se coloca en un foso o patio preparado para su clasificación. Según lo requiera la chancadora o trituradora principal, los bloques de mineral de grandes dimensiones se reducen a los tamaños solicitados. Este método utiliza diversas maquinarias, como cargadoras, perforadoras y otras herramientas; asimismo, se considera a cada una de estas con los operadores o agentes respectivamente capacitados.

b. Chancado: en primera instancia, la trituradora primaria reduce el mineral clasificado a determinados tamaños. Posteriormente, la chancadora secundaria reduce el mineral a magnitudes más pequeñas. Finalmente, el mineral triturado entra rápidamente en la trituradora terciaria, donde se delimita y se prepara para el proceso de molienda.

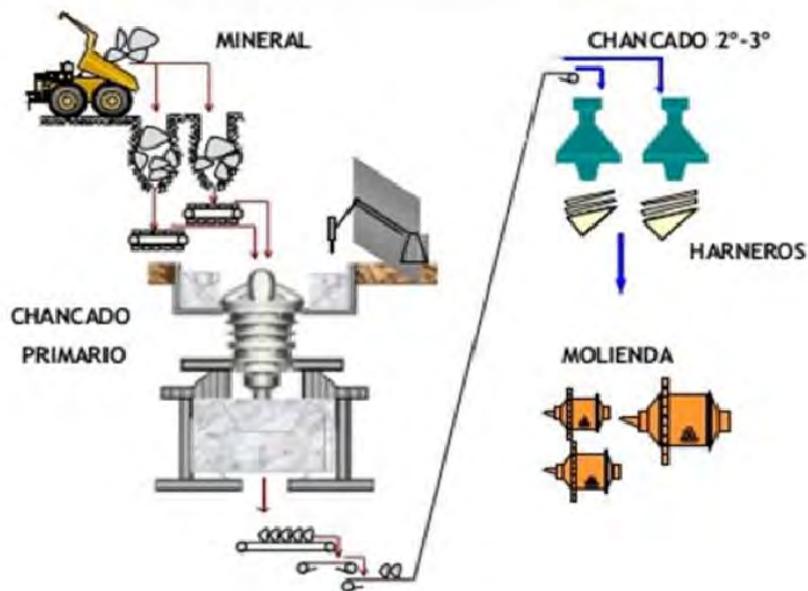
c. Molienda: el mineral triturado combinado con agua se convierte en polvo cuando es colocado en molinos de bolas o de barras; a continuación, el polvo se envía al clasificador, donde la mezcla o combinación, de consistencia relativamente fina, se

¹ Minem, 2017, pp. 7-15.

envía a las celdas de flotación, mientras que la composición gruesa vuelve al molino para ser molida en un nuevo proceso.

d. Flotación: desde el clasificador, se bombea hacia las celdas de flotación el mineral molido, previamente combinado con agua, cal y reactivos. La pulpa de estas celdas es sacudida por un agitador de paletas, mientras una corriente de aire procedente de la mitad inferior de la celda crea burbujas que se impulsa hacia la superficie y arrastran partículas de sulfuro mineral, formando una espuma o crema que desborda las celdas de flotación. Para obtener el concentrado final, esta última se recoge y se espesa o sedimenta antes de pasar por el filtrado. El proceso de flotación pasa por varias etapas, como tipos de concentrado deseado obteniendo dos o más clases de estos.

Ilustración 1. Diagrama de flujo de chancado y molienda



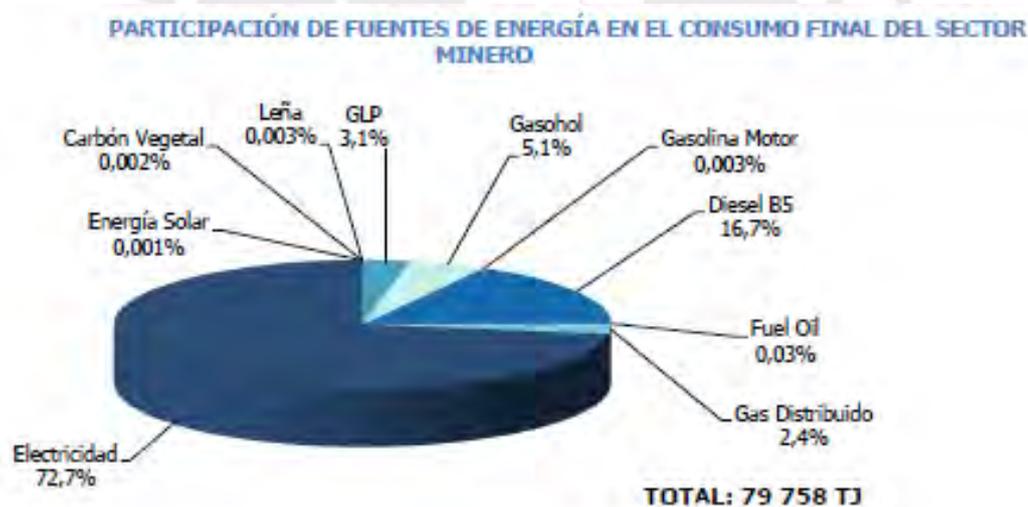
En el proceso de extracción minera se utiliza combustible para trasladar el mineral desde la mina hasta la zona de beneficio; asimismo, requiere electricidad para alimentar el proceso de la obtención del mineral concentrado. La subestación de la planta recoge electricidad a media tensión, normalmente 10 KV, mientras que los montajes eléctricos de la red interna funcionan principalmente a 460 VAC 60 Hz². La cantidad de energía consumida en la mina y en la planta de beneficio depende de varios factores, como el funcionamiento de la planta, la tecnología implementada en las operaciones y el nivel de automatización.

² Minem, 2017, p. 15.

Es importante reconocer que la combustión interna de los motores de los camiones de transporte de mineral, la gran maquinaria utilizada para los traslados por tierra y la movilidad del personal trabajador proporcionan la energía térmica. Las compañías eléctricas pueden encargarse de proveer la electricidad o la propia empresa minera puede producirla con pequeñas centrales hidroeléctricas o térmicas. Evidentemente, la electricidad es de vital importancia para la realización de diversas operaciones en la planta de concentración o lixiviación, así como en la actividad de los servicios auxiliares de la mina, incluido el sistema de ascensores, la iluminación y la ventilación. De igual manera, se utiliza para la luminaria de las instalaciones y el movimiento interno entre procesos.

La distribución del consumo neto de energía para esta sección se acopia como sector exclusivo en minería y metalurgia, con un consumo total de 79 758 TJ, según el *Balance Energético Nacional 2019* del Ministerio de Energía y Minas. Dentro de los sectores de minería y metalurgia, se utiliza energía eléctrica en el 72,7% de los casos y energía térmica en aproximadamente el 27,33%.

Ilustración 2. *Uso de energías en el sector minero*³



Asimismo, la intensidad energética puede expresarse como la cantidad de energía dispuesta por cada unidad de producto concluido (kWh/tonelada, MJ/unidad de producto acabado, galones de combustible/tonelada, kcal/tonelada, BTU/unidad de producto acabado, etc.), es un indicador de la eficiencia energética durante las operaciones industriales. El principal insumo energético empleado en este proceso es la energía eléctrica. Cabe señalar, sin embargo, que para movilizar los materiales y la

³ Minem, 2019, p.34.

tierra se utiliza combustible, que se considera un insumo de energía auxiliar, debido a que no tiene participación en el proceso del concentrado del mineral.

En la figura siguiente, se muestra el reparto del consumo universal de energía eléctrica en los procesos de una planta de concentración minera.

Ilustración 3. *Distribución del consumo eléctrico en los diversos procesos*



La energía como fuente dinámica de trabajo para las diferentes áreas, como son domésticas, comerciales e industriales, está contenida dentro de los ODS. Sin embargo, para nuestro caso, se debe considerar que el consumidor líder es la industria cuprífera y que cada MWh/TM es el indicador que interpreta que tan eficiente puede ser el conjunto de maquinarias que intervienen en los diferentes procedimientos o actividades de la producción de cobre. Por lo tanto, es importante clasificar e identificar las diferentes áreas operativas que intervienen en el consumo de la energía eléctrica para poder cuantificar y tomar medidas y así reducir los consumos de energía, mediante tecnologías disruptivas.

Capítulo 2

Estado de implementación de iniciativas hacia la eficiencia energética en el sector minero latinoamericano.

En Latinoamérica, países como Brasil y México tuvieron la oportunidad de liderar la implementación de la industria de los metales mediante normas y programas que se adecuaron a los cambios de transformación en sus industrias mineras. Como resultado, muchos países de la región tomaron estas experiencias como modelo de desarrollo.

2.1. Normas y programas sobre la eficiencia energética en Perú

En Perú, son numerosas las normas e iniciativas relacionadas con la eficiencia energética, cuyo objetivo es fomentar un menor consumo de energía y el uso de tecnologías que generen mayor eficiencia desde el punto de vista energético en diferentes industrias y sectores.

2.1.1. Ley de promoción del uso eficiente de la energía, Ley N.º 27345

Ley aprobada en el año 2000 que tiene como objetivos: la seguridad sobre el suministro energético, el resguardo de los derechos del consumidor, la promoción de la competitividad en el ámbito económico y la disminución real del impacto ambiental en lo relativo al consumo energético.

Asimismo, considera que la eficiencia energética es el proceso de optimización que ayuda en la seguridad del abastecimiento energético. Es decir que esta opción implica un suministro de energía a bajo costo.

Impacto ambiental: está sustentada en la mejora de la tecnología de eficiencia energética, menor contaminación ambiental global y local.

2.1.2. D.S. N.º 053-2007-EM

El presente decreto pretende establecer un reglamento o normativa sobre las disposiciones para fomentar la utilización eficiente de la energía en el Perú. Cabe mencionar que este se encuentra bajo el régimen de la Ley N.º 27345.

Según la normativa, las entidades del sector público deberán emplear equipamiento eficiente para iluminación y otros usos. Estos necesariamente tienen que

responder a las especificaciones técnicas dispuestas por el Ministerio de Energía y Minas.

2.1.3. D.S. N.º 034-2008-EM

Esta norma establece medidas de ahorro energético en el sector público mediante dos mecanismos. Primero, la sustitución progresiva de las lámparas de iluminación y, segundo, la adquisición o compra de equipamiento que contenga etiqueta de eficiencia energética.

2.1.4. R.M. N.º 469-2009-MEM/DM

Es la resolución que aprueba el plan referencial del uso eficiente de la energía del periodo 2009-2018. Esta normativa es aquella que sostiene la elaboración y la implementación específica del plan de cada región, con el fin de corroborar el cumplimiento a la ley de promoción de uso de la energía eficiente.

2.1.5. D.S. 009-2009-MINAM

Esta norma es una directriz que anima al sector público a adoptar prácticas de ecoeficiencia, como reducir el uso de energía, agua, papel y gasolina y otros combustibles en los medios de transporte. Así, al poner en práctica estas estrategias, se reducirá la producción de residuos, se conservarán los recursos y aumentará la calidad de los servicios públicos. Por consiguiente, el ahorro de costos resultante se destinará a los principales objetivos del desarrollo sostenible.

2.1.6. D.S. N.º 004-2016-EM

Según esta normativa, las empresas públicas que necesiten la adquisición de nuevos equipos energéticos o la sustitución de los antiguos aparatos deberán hacerlo utilizando la tecnología más avanzada que esté presente en el mercado en el momento de su obtención.

2.1.7. R.M. 0186-2016-MEM/DM

Norma que instituye los requisitos para que las entidades del sector público desarrollen auditorías energéticas, cuya facturación mensual por consumo de energía eléctrica sea superior a cuatro UIT.

El sector público como entidad del estado constituye el motor para dinamizar los cambios en la transformación del mercado hacia el uso de productos y servicios más eficientes, así como el comportamiento en el consumo energético de los ciudadanos y de las empresas. Para apoyar al desarrollo energético sostenible del país, la optimización del consumo de energía tiene como objetivo menguar los gastos energéticos.

2.1.8. D.S. N.º 009-2017-EM

Reglamento técnico que establece el etiquetado de eficiencia energética para la maquina y los equipos eléctricos. El Etiquetado de Eficiencia Energética (EEE) es un sistema que se encarga de la clasificación de la eficiencia de la energía en el funcionamiento de los equipos y artefactos. Tal señalización se realiza mediante la etiqueta de eficiencia energética, que va adherida en el producto y brinda información sobre el consumo de energía del equipo, lo que sirve de información para que el cliente seleccione la mejor alternativa durante la compra.

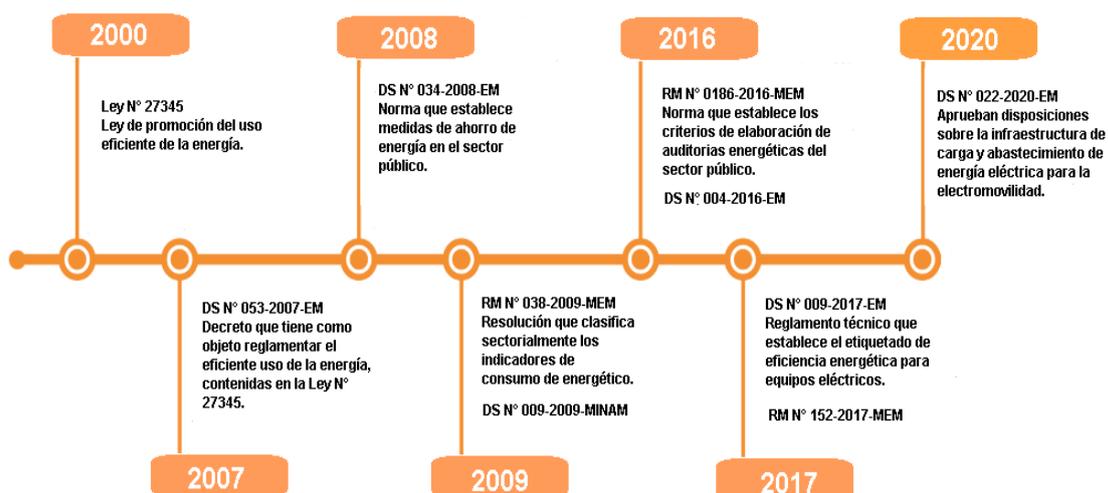
2.1.9. D.S. N.º 022-2020-EM

Con el fin de crear formas de transporte alternativas y ecológicamente beneficiosas, el Minem autorizó las condiciones para poner en marcha la nueva infraestructura de recarga y suministro de energía eléctrica para la electromovilidad.

2.1.10. Decreto Legislativo N.º 1002

Norma que estimula el fomento de la inversión para lograr una mayor generación de electricidad mediante la utilización de reservas energías renovables.

Ilustración 4. Normas publicadas sobre eficiencia energética.



2.2. Programas y políticas de eficiencia energética en países de Latinoamérica

En cuanto a la eficiencia energética, los países de América Latina tienen situaciones diversas. Brasil y Chile son países destacados que han consolidado su marco institucional y regulatorio, e implementado programas exitosos en esta área. Sin embargo, en los últimos años se han observado importantes progresos en la materia a nivel regional, como la promulgación de leyes de eficiencia energética (EE), la creación de agencias específicas y la incorporación de planes de EE en la planificación del sector energético. La búsqueda de estrategias para enfrentar los retos del cambio climático también ha contribuido a destacar la relevancia de la eficiencia energética.

Este capítulo no pretende abarcar todos los temas relacionados con la eficiencia energética, sino destacar los puntos más importantes alcanzados en los países estudiados para ofrecer una visión general de la situación de la EE y su evolución. En los últimos años, se ha experimentado un importante avance en la región en materia legal, institucional y de políticas de fomento a la eficiencia energética. A pesar de que no es una garantía de éxito, disponer de un marco jurídico suficiente ayuda a alcanzar los objetivos. En este sentido, se tiende a reforzar el ordenamiento jurídico y muchas naciones están dispuestas a promulgar leyes especialmente dirigidas a la EE.

El escenario del sector de la eficiencia energética varía significativamente en los países analizados —como Brasil, Chile, Colombia y México—, tanto en el impulso y permanencia de políticas públicas como en el potencial del sector. Sin embargo, se destacan iniciativas comunes como el marco normativo que fomenta el desarrollo e implementación de nuevas fuentes de energía renovable, la regulación enfocada en la

EE y la ejecución de programas de ahorro, eficiencia y competitividad en cada sector productivo, con todo lo cual se mantiene la sostenibilidad del uso humano del medio ambiente.

2.2.1 Análisis de normativas, programas y planes de EE: Caso Brasil

2.2.1.1 Marco Normativo de la Eficiencia Energética

Brasil tiene dos leyes que se enfocan en la eficiencia energética y en la conservación y uso racional de energía siendo estas las bases para el logro de sus objetivos como país.

- Ley N° 9.991 dispone sobre la realización de inversiones en investigación y desarrollo en eficiencia energética por parte de las empresas concesionarias, permisionarias y autorizadas del sector de energía eléctrica.
- Ley N° 10.295 dispone sobre la Política Nacional de Conservación y Uso Racional de Energía.

El éxito de las políticas públicas de ahorro y eficiencia energética ejecutadas por Brasil se debe a un conjunto de factores (Ruchansky y otros, 2011): a) La eficiencia energética es parte de la agenda gubernamental. b) Creación de un marco institucional, legal y reglamentario que se ha venido fortaleciendo. c) Acciones estructurales graduales plasmadas en leyes, disposiciones reglamentarias y ordenanzas interministeriales. d) Conformación de una red de actores que participan en la gobernanza de los programas (ministerios, agencias nacionales, órganos normativos y reguladores, empresas y asociaciones sectoriales, ciudades y gobiernos, entidades de investigación y desarrollo y órgano de defensa al consumidor). e) Definición de la función de la eficiencia energética en la planeación energética nacional de largo plazo.

2.2.1.2. Plan nacional brasileño de eficiencia energética

Brasil diseñó el Plan Nacional de Eficiencia Energética (PNEf) en 2011 sobre la base de los estudios y resultados de Plan Nacional de Energía Eléctrica de 2007. Los actores principales del diseño e implementación del PNEf son el Ministerio de Minas y Energía, la Coordinación General de Eficiencia Energética, las empresas públicas del sector y las Empresas de Servicios Energéticos (ESCOs) representadas por la Asociación Brasileña de Empresas y Servicios (CEPAL/EPE/ADEME/GIZ, 2015). Como parte del plan se creó un grupo de trabajo responsable de elaborar el plan de trabajo para que proponga estrategias y criterios para la ejecución del PNEf. En el plan de trabajo participaron la

Empresa de Investigación Energética, el Centro de Investigación de Energía Eléctrica, el Instituto Nacional de Metrología, Normalización y Calidad Industrial, la Agencia Nacional de Energía Eléctrica, la Agencia Nacional del Petróleo, Gas Natural y Biocombustibles, el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, el Ministerio de Medio Ambiente y la Universidad Federal de Itajubá, bajo la coordinación del Ministerio de Minas y Energía (CEPAL/EPE/ADEME/GIZ, 2015).

2.2.1.3 Objetivos específicos

Los objetivos específicos del PNEf son:

- i) Asegurar el abasto de energía.
- ii) Diversificar la matriz energética con el uso de fuentes de energía renovable.
- iii) Fomentar el uso de fuentes energéticas renovables y competitivas.
- iv) Tecnología nacional.
- v) Favorecer la competitividad económica y la inclusión social con tarifas razonables.
- vi) Fomentar la inclusión social en los servicios de distribución de energía.
- vii) Estabilizar el marco regulatorio con el fin de atraer mayor inversión para el sector.

2.2.2. Análisis de normativas, programas y planes de EE: caso Chile

2.2.2.1. Marco normativo de eficiencia energética

En Chile, de acuerdo con el Ministerio de Energía, desde el año 2005, se ha manifestado un gran progreso en las políticas públicas aplicadas hacia la eficiencia energética. Implementado en 2006, el Programa País de Eficiencia Energética (PPEE) fue el primer plan de eficiencia de la energía de Chile. Los principales objetivos del programa durante su primera fase, que finalizó en 2007, fueron aumentar la responsabilidad y la conciencia en los diferentes sectores, mejorar la comprensión de las oportunidades que ofrecía la legislación propuesta y exponer las ventajas de la eficiencia energética. La segunda etapa del programa empezó en 2007, cuya meta primordial fue crear una política de eficiencia energética a largo plazo. Para ello, se asignó un presupuesto de aproximadamente 40 millones de USD en 2010, el cual permitió realizar las siguientes acciones:

- a. Elaboración del Plan Nacional de Acción de Eficiencia Energética (2010-2013)
- b. Creación de la Agencia Chilena de Eficiencia Energética (2010) y su relevancia en documentos de política energética, como en la estrategia nacional de energía 2012-2030.

c. Educación, capacitación y entrenamiento para aumentar la eficiencia energética.

d. Asistencia técnica para la industria, comercio y sector público.

e. Incentivos financieros para el desarrollo del mercado de eficiencia energética.

f. Perfeccionamiento del marco regulatorio legal.

g. Ruta energética 2018-2022. Gracias a este último instrumento, se ha articulado la eficiencia energética como un eje que promueve la sostenibilidad.

En 2014, el gobierno presentó la *Agenda de energía*, cuyos objetivos proponen «Desarrollar el uso eficiente de la energía como un recurso energético, para reducir en un 20% el consumo proyectado al 2025»⁴, lo que establece una meta de ahorro de 20 % al año 2025 respecto del crecimiento tendencial del consumo de energía para esa fecha. También incluye elaborar una estrategia de desarrollo energético a 2050 que integre a la EE como uno de los pilares esenciales. Cabe resaltar que la creación de la Agencia Chilena de Eficiencia Energética (AChEE) se creó en el 2010 y reemplazó al PPEE.

En los años siguientes, la AChEE continuará con el fortalecimiento de sus programas en los siguientes aspectos:

a. Formación interna y externa de la agencia.

b. Cogeneración en las industrias.

c. Desarrollo y ensayos tecnológicos.

d. Expansión de la educación en EE en el sector escolar.

e. Fortalecimiento de la educación superior en EE.

2.2.2.2. Ley de eficiencia energética

Desde febrero de 2021, Chile cuenta con su primera Ley de Eficiencia Energética, que están enfocada en el uso racional y eficiente de los recursos energéticos, pues existe un gran nivel de consumo de energía en el país mencionado.

2.2.2.3. Industria y minería

Para los grandes consumidores de energía que están dentro de aquellos consumidores que representan más de un tercio del total de energía del país, para estos consumidores con capacidad de gestión energética, se tendrá que implementar un sistema de gestión de la energía (SGE). Además, estos sectores tendrán que comunicar

⁴ MEM, 2014.

anualmente al ministerio correspondiente acerca del uso de energía y otros indicadores de consumo. Este organismo es el encargado de realizar un reporte público del mismo.

2.2.2.4. Programas de Eficiencia Energética

Los gobiernos de las naciones latinoamericanas han establecido el cargo de administradores de programas, quienes trabajan para organizaciones o departamentos encargados de esbozar, desarrollar y aplicar políticas que contribuyan al ahorro energético. Bajo esta definición, las organizaciones que delegan esta tarea son: AChEE (Agencia Chilena de Eficiencia Energética), que antes se llamaba PPEE o Programa País de Eficiencia Energética, y los programas que se indicarán a continuación, que son dirigidos por la AChEE. Estos se restringen a las industrias dominantes del subsector minero, que son el transporte y la industria.

La Agencia Chilena de Eficiencia Energética lleva a cabo los siguientes programas:

Tabla 1. *Programas de EE de la Agencia Chilena de EE*

Sector	Programa	Comienzo	Tecnología	Uso
Industria	ISO 50001	2011	ISO	Gestión energética
Industria	Formación de capacidades	2013	Varios	Formación
Industria	Medidas y estándares de EE en las etapas previas a la puesta en marcha de nuevos procesos y proyectos	2011	Varios	Varios
Industria	Programa de fomento al desarrollo de anteproyectos de eficiencia energética	2011	Auditorías	Gestión energética
Industria	Sistemas de gestión de la energía	2011	Auditorías	Gestión energética
Transporte	Transporte de carga	2011	Carga	Transporte

Transporte	Incentivo a la adopción voluntaria de las técnicas de conducción eficiente	En desarrollo	Vehículos eléctricos masivos	Transporte
------------	--	---------------	------------------------------	------------

Fuente: Báez, M.; Briano, J. & Moya, R., 2016.

Detallaremos los alcances de programas de eficiencia energética para el sector industrial y transporte.

2.2.2.5. Plan de Eficiencia Energética

El trabajo de eficiencia energética está centrado en:

- Planificación estratégica de gestión de energía corporativa para el próximo quinquenio.
- Actualización de cartera y priorización proyectos de eficiencia energética

Tabla 2. Corto plazo (iniciativas a implementar el 2020)

División/proceso	Proyecto/iniciativa	Descripción	Estado
Corporativo	Sistema de gestión de energía	Desarrollo de un plan de cierre de brechas del SGE respecto a un tipo ISO 50001	En revisión
Corporativo	Electromovilidad	Estimación de vehículos eléctricos para transportar personal desde planta a su domicilio	En curso
Corporativo	EE en combustibles	Implementación de gestión de combustible	A partir del 04-2020
Corporativo	Transformación digital	Para instalar las nuevas formas de operar	En curso

Fuente: Codelco, 2020, pp. 14-15.

Tabla 3. Mediano plazo (iniciativas a implementar el 2020-2021)

División/proceso	Proyecto/iniciativa	Descripción	Estado
Corporativo	Sistema de gestión de energía	Implementación del plan de cierre de brechas de mediano plazo del SGE	En revisión
Radomiro Tomic	CAEX con GLN	Utilización de GLN en CAEX en reemplazo del combustible diésel	Perfil
Chuquicamata	Valorización energética de neumáticos fuera de uso	Utilización de diésel obtenidos de neumáticos fuera de uso	Prefactibilidad

Fuente: Codelco, 2020, pp. 14-15.

Tabla 4. Largo plazo (iniciativas a implementar a partir 2022)

División/proceso	Proyecto/iniciativa	Descripción	Estado
Corporativo	Hidrógeno como combustible de CAEX	Conversión de camiones de (CAEX) que operan con hidrógeno y celdas de combustible	Prefactibilidad

Fuente: Codelco, 2020, pp. 14-15.

2.2.2.6. Consumo de energía de la minería de cobre a nivel nacional

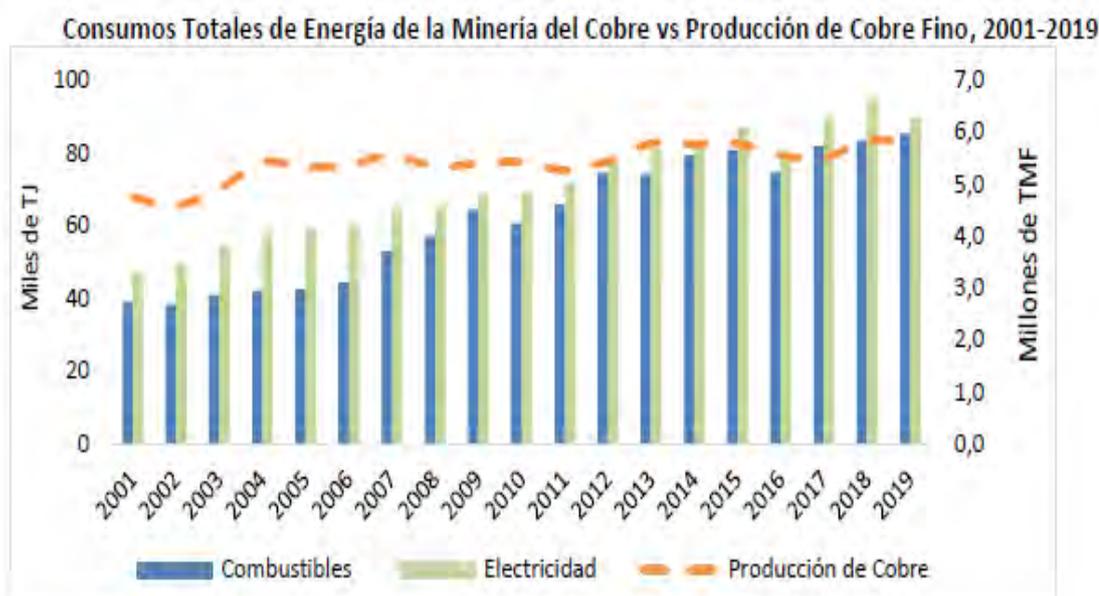
En las siguientes líneas se indican resúmenes de consumos energéticos estimados en la producción del cobre en la minería chilena.

2.2.2.6.1. Consumos totales de energía en la minería del Cu

Históricamente, en el periodo 2001-2019, la producción de cobre tiene un crecimiento de tasa anual del 1,2 %, con lo que llegó al año 2019 a producir 5,78 TMF y que representaría un crecimiento del 22,1 % en el periodo considerado.

La participación promedio en el consumo de energía en el intervalo 2001-2019 es de 46,3 % en combustible y de 53,7 % en electricidad.

Ilustración 5. Resultados de consumo energético para la producción del cobre



Fuente: Cochilco

2.2.3. Análisis de normativas, programas y planes de EE: caso Colombia

El Ministerio de Minas y Energía informa que, desde 2001, en Colombia, las políticas en torno a la eficiencia energética se han fortalecido. Este progreso se puede observar en el gran refuerzo del marco normativo actual, dado que incluye las Leyes 697 de 2001 y 1715 de 2014, cuyo objetivo es facilitar la adopción del sistema integrado de gestión energética y organizar las fuentes de apoyo y financiamiento para los planes, iniciativas y programas de eficiencia energética. Gracias al robustecimiento del marco institucional y la fijación de medidas a corto, mediano y largo plazo, basadas en mejores datos sobre el consumo nacional y la utilización de energía sostenible, estas recomendaciones generales deberían fomentar y sostener el crecimiento de un mercado de eficiencia energética.

2.2.3.1. Objetivos específicos

- a. Definir metas claras indicativas sobre eficiencia energética, consumo energético y equipo para los consumidores de uso final de energía.
- b. Implementar condiciones económicas, técnicas, regulatorias y de información para poder impulsar un mercado de bienes y servicios energéticos eficientes.
- c. Fortalecer las instituciones de carácter privado y mixto para incentivar iniciativas de proyectos y subprogramas que serían parte de Proure.
- d. Promover las normas relacionadas con incentivos, lo que debe incluir a los tributarios para incentivar el desarrollo de los proyectos y subprogramas que forman parte de Proure.
- e. Fortalecer en la sociedad colombiana una cultura de manejo sostenible de los recursos naturales a lo largo de la cadena energética.
- f. Impulsar las metas del plan de acción de los compromisos adquiridos en la COP21 en los planes sectoriales y diversos programas adyacentes a estos.

2.2.3.2. Programas de Eficiencia Energética

Después de 15 meses de gobierno actual 2018-2022, ya existen 14 proyectos listos para su ejecución en la construcción de 2 500 megavatios, 50 veces la capacidad de 2018. Las energías renovables no convencionales pasarían del 1 % al 12 % en la generación de la matriz de energía.

La transición energética no solo implica mayor inversión, miles de empleos, sino también que los colombianos serán beneficiados en la facturación por este servicio de energía eléctrica y habrá una reducción de más de 9 MT de CO₂.

Colombia cuenta con la matriz de generación eléctrica más limpia del mundo, con un 70 % de generación hídrica, 12,3 termoeléctricas que usan gas natural, 9,3 % térmicas a carbón, 7,8 % que usan diésel y gasolina, y 1 % de fuentes no convencionales como energía solar y eólica.

En el 2019, Colombia logró la incorporación de su matriz energética de energías renovables no convencionales. El 2022, alcanzaría a multiplicar por 50 veces la generación por fuentes renovables como energía solar y eólica, y pasaría de 50 MW a una capacidad de 2 500 MW.

En ese marco, se observa que Colombia avanza en la diversificación de su matriz energética, lo cual implica que podrá enfrentar los cambios climáticos y mitigar sus efectos. Gracias a la capacidad instalada, se espera un cambio de al menos 1 % a 12 % de generación eléctrica en el año 2022; de esta forma, conseguirá una reducción de

hasta 9 MT de CO₂ en el 2030. Según el Foro Económico Mundial 2020, es el país en América latina con el mayor progreso dentro de los procesos de transición energética. Se posicionó en el puesto vigésimo quinto, después de Uruguay, undécimo.

El 28 de febrero de 2019, el Ministerio de Minas y Energía, en conjunto con la Comisión de Regulación de Energía y Gas y el operador del mercado XM, realizó la subasta para expandir el parque de generación colombiana, debido a la demanda de energía eléctrica. En esta subasta se buscó garantizar proyectos con obligaciones de energía firme, la cual está diseñada para garantizar la misma a largo plazo y a precios eficientes. Se lograron nuevos proyectos para ampliar el parque generador en 4 010 MW, de los cuales 1 160 MW son eólicos y 238 MW son solares.

Se adoptaron medidas para incentivar la compra de energía limpia en el sector eléctrico, por ejemplo, que el 8 % y 10 % que las empresas comercializadoras obtienen para distribuir entre sus clientes procedan de proyectos de generación de energías renovables no convencionales.⁵

Colombia avanza en los proyectos de mitigación y energía sustentable para poder cumplir con los acuerdos de la COP21 de reducir los GEI en un 20 % al 2030; es decir, 66,5 millones de toneladas de CO₂. El Plan Integral de Gestión de Cambio Climático apunta a una reducción de 11,2 MT de CO₂ para el 2030, que aportaría con el 17 % de la meta nacional.

Proyecciones de la diversificación energética, alcances en la reducción los GEI hacia el año 2030.⁶

2.2.3.2.1. Generación de energía

Potencial de reducción al 2030.

4,7 MT de CO₂.

Diversificación energética para la generación de energías renovables no convencionales.

2.2.3.2.2. Eficiencia energética en el sector minero-energético

Potencial de reducción al 2030.

1,2 MT de CO₂.

⁵ MME, 2020.

⁶ MME, 2020.

Metas en el Programa de Uso Racional y Eficiencia de Energía y Fuentes No Convencionales (Proure).

2.2.3.2.3. Emisiones fugitivas

Potencial de reducción al 2030.

3,2 MT de CO₂.

MME, modelo de estimación de emisiones fugitivas del sector hidrocarburos.

2.2.3.2.4. Gestión activa de la demanda

Potencial de reducción al 2030.

2 MT de CO₂

Caracterización del uso de la energía eléctrica en hogares y empresas. Se establecieron seis tipos de consumo.

2.2.4. Análisis de normativas, programas y planes de EE: caso México

Para aplicar medidas de ahorro y eficiencia energética en México es fundamental contar con una normativa oficial que homogenice y promueva el uso eficiente de la energía en los estados, municipios, y también en los sectores industrial y empresarial. La Comisión Nacional para la Utilización Eficiente de la Energía (Conuee) es el organismo regulador encargado de establecer los requerimientos mínimos para mejorar la gestión energética en las instalaciones. En México existen las Reglas Oficiales Mexicanas (ROM), que son regulaciones técnicas de cumplimiento obligatorio. Además, hay reglas voluntarias desarrolladas por los Organismos Nacionales de Normalización (ONN), que son dependientes de la Secretaría de Economía y que complementan las reglas oficiales, por lo que pueden volverse obligatorias si los organismos públicos comienzan a exigirlos.

El sector industrial en México es uno de impulsores fundamentales del crecimiento económico que contribuye con más de una sexta parte del valor agregado. También representa uno de los sectores con mayores niveles de encadenamiento y desempeña un papel determinante en la difusión de la innovación y mejores prácticas para promover la competitividad de la industria. La eficiencia energética permite mejorar la gestión energética de las organizaciones, lo cual se traduce en un aumento de la productividad y, por ende, de la competitividad. Además, conlleva efectos positivos

relevantes, como la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y la disminución de la presión sobre la demanda y la infraestructura energética. En ese sentido, la eficiencia energética es una herramienta fundamental en el camino hacia la transición energética de un territorio.

En este marco, el objetivo primordial de esta etapa del plan ha sido proporcionar información para mejorar la hoja de ruta en temas relacionados a la eficiencia energética, publicada en enero de 2017, con el fin de implementar una serie de pasos que contribuyan a lograr las metas de eficiencia energética señaladas en la estrategia de transición para fomentar la utilización de tecnologías y combustibles más limpios en la zona industrial. A lo largo de todo el proceso se buscó fortalecer las herramientas de política pública dirigidas a fomentar la eficiencia energética en la industria mediante mecanismos institucionales, regulatorios, económicos, financieros, y de información y desarrollo de capacidades, tanto de manera directa como indirecta.

2.2.4.1. Marco Normativo de EE

El análisis normativo para México se rige bajo la Ley de Transición Energética, la cual fue promulgada el 24 de diciembre de 2015. Al revisar el artículo N° 2 del marco normativo, se reconocen tópicos vinculados al tema de investigación de esta tesis, tales como:

- a. De manera económicamente viable, ayudar a cumplir los objetivos de energía limpia y eficiencia energética establecidos en esta legislación.
- b. Definir las responsabilidades en relación con la eficiencia energética y el uso y beneficio sostenible de la energía.
- c. Crear sistemas para fomentar las fuentes de energía renovables y reducir las emisiones tóxicas y contaminantes.
- d. Impulsar que la Ley General de Cambio Climático tenga como objetivo primordial el descenso de la emisión de compuestos y gases de efecto invernadero.
- e. Estimular el consumo final de energía de forma sostenible.

De acuerdo con lo anterior, México ha creado un plan de transición para fomentar el uso de combustibles y tecnologías más ecológicos. Esta estrategia incluye tanto un componente de planificación a medio plazo (15 años) como a largo plazo (30 años). Así, esta funciona como una brújula para la política energética nacional, que informa la creación del Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía (Pronase). En este último, se aborda brevemente el sector de la fabricación industrial, y

también los métodos y fuentes de generación de energía limpia adecuados para la matriz energética industrial.

La eficiencia energética es una de las piedras angulares de esta estrategia, y a través de iniciativas y medidas destinadas a mejorar la eficiencia energética, así como la utilización de fuentes de energía renovables en el sector industrial, se establece un potencial de disminución del uso sectorial del 41%. Los objetivos finales de reducción de la intensidad del consumo energético son del 1,9% anual para 2016-2030 y del 3,7% anual para 2031-2050.

En el marco de esta estrategia, se establecen líneas de acción específicas para el sector industrial que sirven como antecedentes para el Pronase y se basan en experiencias previas en el campo de la eficiencia energética. Para controlar los resultados de su ejecución, se adiciona también un plan de seguimiento de indicadores, donde la reducción de la intensidad de la energía y de las emisiones en el sector industrial son los indicadores que se han determinado.

2.2.4.2. Programas de Eficiencia Energética

2.2.4.2.1. Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía 2014-2018 (Pronase).

La Ley de Transición Energética, que exige la elaboración del Pronase en sus apartados 35 y 36, es el marco legal que la sustenta. El Pronase 2014-2018 fue creado por la Conuee⁷, por directriz de la Sener⁸, y publicado en abril de 2014. La publicación de la LTE en 2016 le brindó actualizaciones al documento. Para lograr el mejor uso posible de la energía en todos los sectores y cadenas de producción y consumo, el programa consta actualmente de seis metas puntuales, dieciocho estrategias y sesenta y nueve lineamientos de acción.

2.2.4.2.2. FIDE - Programa de Eficiencia Energética

Este programa ofrece ayuda técnica y opciones financieras para proyectos en industrias y Pymes, al tiempo que fomenta el empleo óptimo de la electricidad mediante la aplicación de diversas tecnologías, por lo que se centra en acciones relacionadas con la sustitución de equipos. Como resultado, dicho programa ha logrado una gran aplicación en el FIDE. Sin embargo, al concentrarse en la sustitución del equipamiento,

⁷ Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía

⁸ Secretaría de Energía

ignora la posibilidad de encontrar y aprovechar algún posible mejoría o perfeccionamiento en la eficiencia energética, limitando su aplicabilidad en la industria.

2.2.4.2.3. Programa de Apoyo a la Generación Distribuida

El FIDE⁹ está a cargo de este programa, el cual fomenta la instalación de sistemas de autogeneración a partir de fuentes energéticas renovables y la cogeneración *in situ* efectiva. Como consecuencia, reporta 2,044 proyectos que han recibido financiamiento por un total de 440,000,000 MXN; esto generó una capacidad instalada de 16.2 MW. A pesar de la falta de información sobre los proyectos en el sector industrial, se supone que, a partir de estas cifras, se reconoce las instalaciones a escala de las PYME. En tal sentido, es necesario un esfuerzo concertado para que este programa ayude a las PYME a evaluar la viabilidad, la capacidad y la conveniencia de las instalaciones de microgeneración.

2.2.4.2.4. Financiamiento a proyectos sustentables

La financiación primaria para empresas, compañías o intermediarios financieros que trabajen en proyectos que busquen gestionar alternativas sostenibles. Se señalan específicamente que las acciones relacionadas con la eficiencia de la energía tengan un plazo máximo de 20 años. Debido a sus directrices de funcionamiento, esta iniciativa se centra sobre todo en las fuentes energéticas renovables. Por ello, para establecer normas, evaluar a los candidatos y prestar asistencia a la industria en materia de eficiencia de la energía, es preciso inspeccionar las normas de funcionamiento.

2.2.4.2.5. Conuee, Programa Nacional de Sistemas de Gestión de la Energía (Pronasgen)

Este programa ofrece asistencia a los participantes y fomenta la implantación de sistemas de gestión energética basados en la norma ISO 50001. Con la ayuda de organizaciones de participación y colaboración internacional, en el 2016, participó en unas 50 instalaciones. Asimismo, con el fin de desarrollar, mejorar y fortificar la

⁹ Fidecomiso para el ahorro de energía eléctrica

capacidad de los usuarios de patrones de alto consumo (UPAC) y la APF para aplicar SGEN, en 2015, se agregaron las redes de aprendizaje.

2.3. Conclusiones de los programas de EE del sector minero en Latinoamérica

El siguiente cuadro involucra la elección de los programas de eficiencia de energía que vienen desarrollándose en Latinoamérica con orientación a ser implementados en el sector minero y serán parte del análisis de esta investigación en los siguientes capítulos.

Tabla 5. *Programas de EE relacionados al sector minero en Latinoamérica*

Programa EE	Chile	Brasil	México	Colombia
Sistema de gestión de la energía ISO 50001	x	x	x	x
Empresas de servicios energéticos ESCOS	x	x	x	x
Etiquetado de eficiencia energética para equipos energéticos	x	x	x	x
Estándares mínimos de eficiencia energética	x	x	x	x
Generación distribuida de energías renovables	x	x	x	x
Financiamiento de proyectos de EE	x	x	x	x
Premio o distinción nacional de EE	x	x	x	x
Vehículos eléctricos	x	x	x	x

Fuente: Elaboración propia

2.4. Desafíos que enfrenta América Latina en cuanto a la implementación de medidas de eficiencia energética en el sector minero

a. Falta de reglamentación y de información sobre alternativas tecnológicas: según expertos del rubro minero, la falta de regulación y de información sobre alternativas tecnológicas es un desafío importante en América.

b. Resistencia al cambio: la industria minera suele ser conservadora y resistente al cambio. Esto puede limitar la aplicación de medidas de eficiencia energética.

c. Costos de inversión: para la implementación de medidas de eficiencia energética del sector minero, los costos iniciales de inversión en equipos eficientes son muy altos. Lo que dificultaría que muchas empresas acojan disposiciones o medidas en programas de eficiencia energética.

d. Marco institucional débil: según un informe del Banco Interamericano de Desarrollo, el marco institucional débil es un desafío importante en América Latina, ya que puede limitar la implementación de parámetros o medidas de eficiencia energética.

e. La falta de capacitación y conocimiento: la implementación de medidas de eficiencia energética necesita de profesionales preparados y capacitados, sino ocurriese esto podrían estar limitados en adoptar medidas sobre eficiencia energética.

f. Falta de incentivos: en muchos países de la región, en el sector minero no existen políticas claras que incentiven las inversiones en equipos eficientes. La carencia de incentivos fiscales y financieros hace que las empresas no adopten medidas de eficiencia energética.

g. Desafíos geopolíticos: en algunos países de la región ocurre que la inestabilidad, la corrupción y la falta de seguridad ralentizan que muchas empresas mineras inviertan en tecnologías eficientes.

En general, la implementación y ejecución de medidas para la eficiencia energética en América Latina enfrenta desafíos importantes, como la falta de reglamentación y de información sobre alternativas tecnológicas, las brechas culturales y de formación, el limitado acceso a crédito y a mecanismos de incentivos financieros y fiscales, el marco institucional débil y la inestabilidad política y de seguridad que muchos países de la región enfrentan.

Capítulo 3

Situación actual de la minería del cobre en el Perú

Para analizar la situación actual de la industria minera del país, se ha evaluado la información relevante de las estadísticas en producción, inversión y exportación de los últimos dos años (2019-2020),^{10 11} el panorama actual y la evolución esperada de la actividad minera en el Perú.

3.1 Reservas y producción de cobre en el Perú

3.1.1. Producción minera del sector metálico

Durante el año 2019, se evidenció uno de los más altos registros en la producción de cobre, este fue un hecho histórico y que es relevante mencionar. Se obtuvo 2,46 millones TMF, que viene a ser el 12,1 % de la producción mundial, y molibdeno, de 30 441 TMF, que sería el 10,3 %. Fue la región Arequipa la mayor productora de cobre (Sociedad Minera Cerro Verde y la Minera Las Bambas) y molibdeno (Sociedad Minera Cerro Verde). Se observa en la siguiente tabla.

¹⁰ Información estadística relevante sobre la industria minera realizada por el Minem-DGPSM. Publicado en el *Anuario minero 2019*.

¹¹ Minem, 2020.

Tabla 6. Producción minera del sector metálico

Producto	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Cobre mill. TMF	1,25	1,24	1,30	1,38	1,38	1,70	2,35	2,45	2,44	2,46
Oro TMF	164,08	166,19	161,54	151,49	140,10	146,82	153,01	151,96	140,21	128,41
Zinc mill. TMF	1,47	1,26	1,28	1,35	1,32	1,42	1,34	1,47	1,47	1,40
Plata TMF	3,640	3,419	3,481	3,674	3,768	4,102	4,375	4,418	4,160	3,860
Plomo TMF	261,99	230,199	249,23	266,47	277,29	315,52	314,422	306,78	289,123	308,11
Hierro mill. TMF	6,04	7,01	6,68	6,68	7,19	7,32	7,66	8,81	9,53	10,12
Estaño TMF	33,848	28,882	26,105	23,668	23,105	19,511	18,789	17,790	18,601	19,853
Molibdeno TMF	16,963	19,141	16,790	18,140	17,018	20,153	25,757	28,141	28,034	30,441

Fuente: Minem, 2019, p. 48.

A nivel mundial, el Perú es la segunda nación que cuenta con importantes reservas de cobre (3), zinc (3), molibdeno (3) y oro (5), además de la mayor reserva de plata a nivel mundial. En evidencia, estas cantidades son pruebas fehacientes de la copiosidad de sus recursos, lo cual repercute directamente en la capacidad de producción.¹²

Tabla 7. *Ranking mundial y regional en producción minera, año 2019*

Producto	Latinoamérica	Mundo
Oro	1	6
Cobre	2	2
Plata	2	2
Zinc	1	2
Plomo	1	3
Estaño	1	4
Molibdeno	2	4

Durante el periodo enero 2020 - diciembre 2019, la producción minera fue perjudicada considerablemente, esto debido al estado de emergencia nacional e internacional generado por el COVID-19. Algunos elementos como el cobre (-14,8 %), el oro (-32 %), el zinc (-5,3 %), la plata (-22,5 %), el plomo (-21,9 %), el hierro (-12,1 %), el estaño (4 %) y el molibdeno (+5,7 %) fueron afectados con respecto al mismo periodo del año 2019.¹³

La minería peruana en su producción mostró una caída de 13,54 %, la cual se acumuló durante enero y diciembre del 2020. Esta medición se realizó con respecto al año 2019.¹⁴

¹² U. S. Geological Survey (USGS): Según el reciente ranking mundial realizado por el Mineral Commodity Summaries, 2020.

¹³ Minem, 2020.

¹⁴ Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI], 2020, p.20.

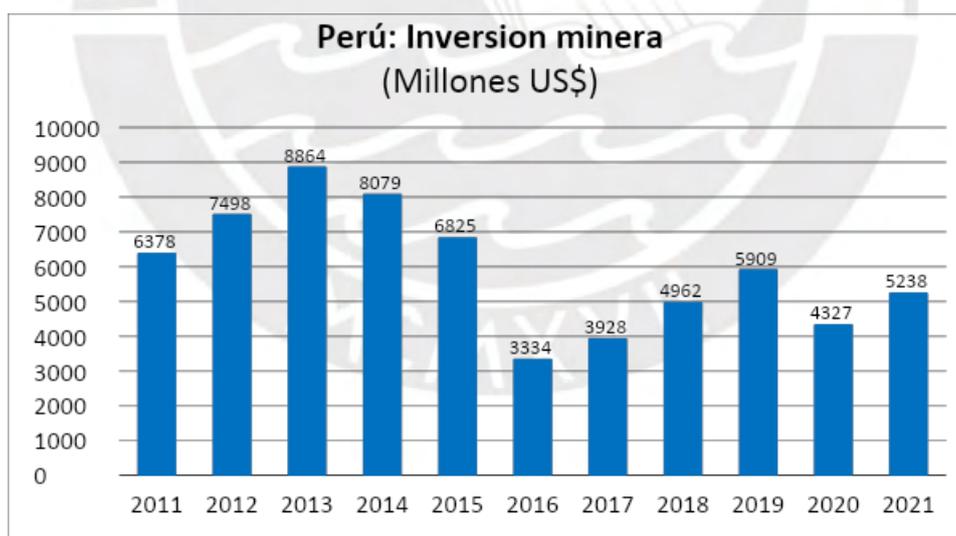
3.1.1.1. Inversiones del sector minero metálico

Los flujos de inversión privada del sector minero entre los años 2011-2015 promediaron 7 529 millones USD; en el periodo 2016-2019, se redujeron a 4 533 millones USD; en el 2020, se redujo a 4 327 mill. USD; sin embargo, el año 2021 se recuperó a 5 238 millones USD, monto descentralizado en 24 regiones, siendo las regiones más favorecidas Ica, Moquegua, Tacna y Arequipa. Estos territorios figuran aproximadamente como la mitad de todo el dinero invertido.

El futuro de la inversión privada minera depende de 59 proyectos valorizados en 52 927 millones USD. La inversión está distribuida en 16 regiones, siendo Cajamarca y Apurímac las regiones más pobres en donde se concentra casi el 50 % de toda la inversión minera.

La contracción minera en el primer semestre de 2020 se dio principalmente por la suspensión temporal de tres grandes proyectos: Mina Justa (1 600 millones USD), la ampliación de Toromocho (1 350 millones USD) y Quellaveco (5 300 millones USD). Estas actividades fueron paralizadas debido a las restricciones efectuadas por la pandemia.

Ilustración 6. Inversión minera 2011-2021 (ver Anexo 8)



Cabe señalar que las inversiones en exploración no solo están disminuyendo en el Perú, sino que es una tendencia global en los países con actividad minera importante. Al 2021, el portafolio de proyectos de exploración minera suma 60 en total, el cual tiene una inversión integral de 506 millones USD.

3.1.1.2. Exportaciones del sector minero metálico

La minería en los últimos 10 años generó un promedio de 59,4 % de las exportaciones totales. En el 2019, el monto de exportación minera fue de 28 074 millones USD, con una cartera de productos diversificados en la que destaca el cobre, oro, zinc, plata y cantidades significativas de plomo, molibdeno, estaño y hierro. China (38 % del total) fue el principal mercado de las exportaciones mineras, seguido de la India (18 %), EE. UU., (9 %), Suiza (8 %) y Corea del Sur (6 %).¹⁵

Cabe señalar que, en el año 2020, la caída en las exportaciones se da por el retroceso en la producción minera y por las restricciones comerciales debidas a la pandemia.

El sector minero sigue siendo el principal componente de las exportaciones peruanas. El año 2021 (ene-nov) representó el 56,6 % de las exportaciones totales.

Ilustración 7. Exportaciones mineras 2011-2021 (ver Anexo 7)



3.2. Participación de la minería en la economía del país

Para relacionar los efectos del sector minero en la economía peruana habría que examinar diversos factores, como la recaudación de impuestos desde los ingresos fiscales y la generación de puestos de trabajo directos e indirectos.

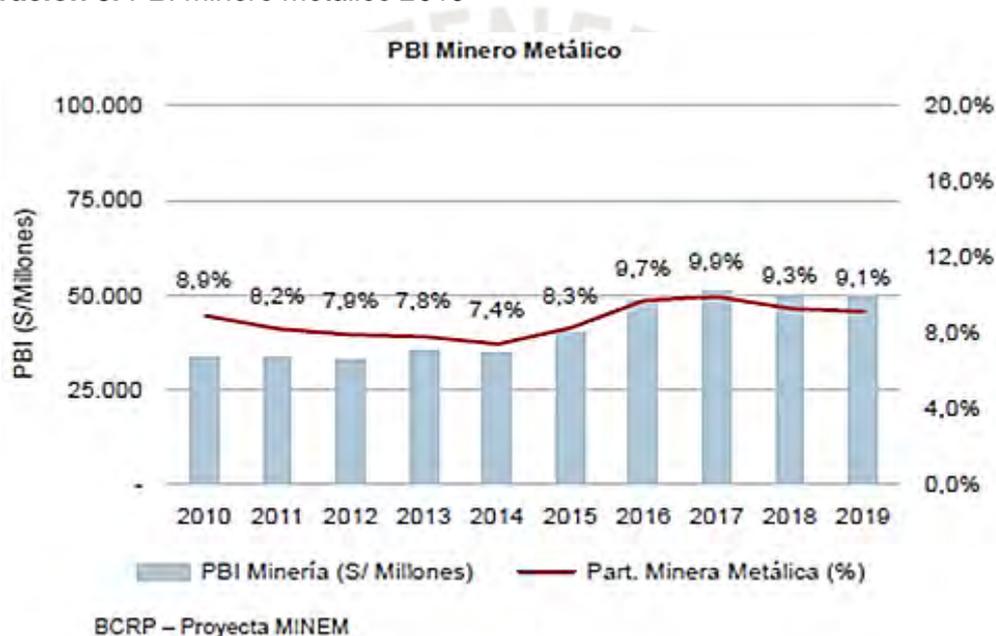
¹⁵ Peñaranda, 2019.

3.2.1. PBI del sector minero

Entre 2010 y 2013, el PBI del sector minero experimentó un decrecimiento sostenido y moderado. Durante ese período, se registraron disminuciones del 0,4 % y 0,6 % en comparación con los años 2014 y 2018, respectivamente.

Los aportes de la minería al PBI nacional también han variado en estos años. En 2010, representaba un 8,9 %, mientras que en 2013 disminuyó al 7,8 %. Sin embargo, en el año 2019, aportó aproximadamente el 9,1 % del PBI nacional. Estas cifras demuestran la relevancia gravitatoria de la minería en el panorama económico del país.

Ilustración 8. PBI minero metálico 2019¹⁶



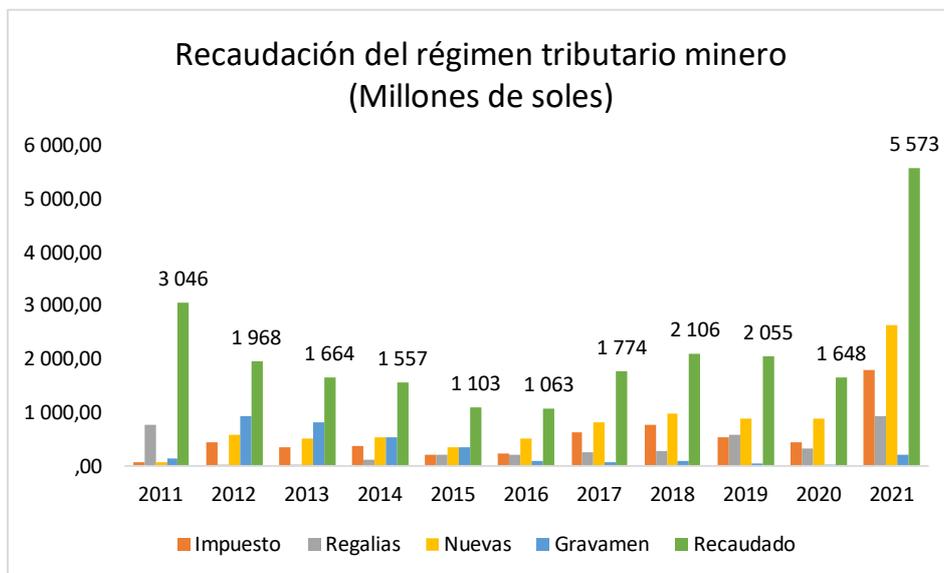
3.2.2. Aporte fiscal de la minería

Los tributos internos (impuesto especial a la minería, regalías mineras, nuevas regalías mineras y gravamen especial a la minería) y en particular el impuesto a la renta, son el principal indicador para medir el aporte de la minería en ingresos fiscales. Si se observa la evolución de los tributos a partir de los años 2011-2021, resalta que el periodo 2012-2018 tuvo una caída significativa en el 2016, que se recuperó con los aportes del año 2018, S/. 6 658 millones. Por otro lado, el aporte de la minería en tributos alcanzó el año 2021 una cifra récord de S/. 14 111 millones. En el contexto actual, analizar

¹⁶ Sociedad Alemana de Cooperación Internacional [GIZ] & Samienergy, 2021, p. 40.

anualmente los aportes fiscales representa un buen indicador para ver la evolución de nuestra economía y así poder medir los aportes mineros.

Ilustración 9. Participación de la minería en los aportes fiscales¹⁷

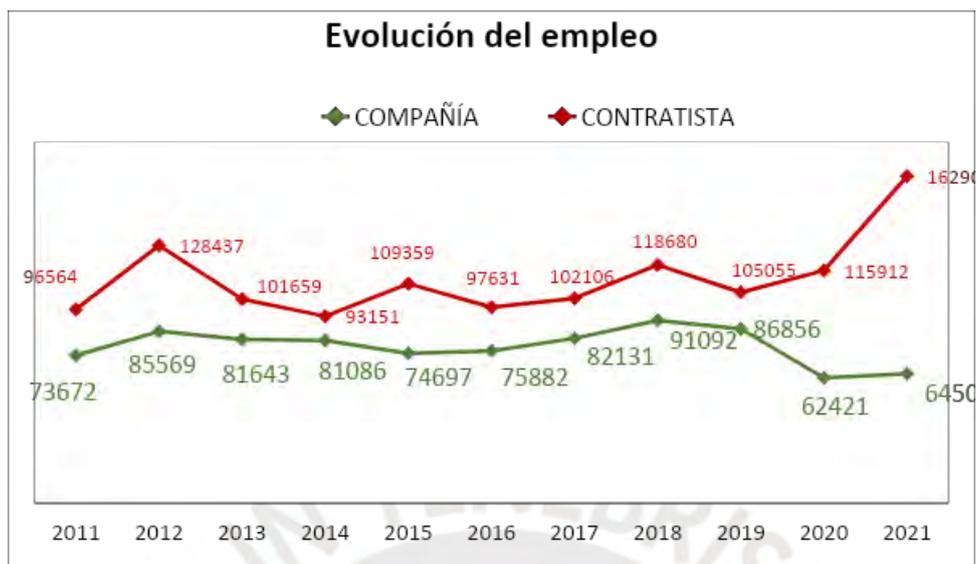


3.2.3. Empleo directo en el sector minero

La minería tiene el atributo de emplear el menor número de trabajadores informales por actividad económica. El promedio en el periodo de los años 2011-2017 fue de 183 370 empleos, siendo el año 2018 el año en que creció a 209 772 empleos directos. En consecuencia, una vez superados los años críticos de la pandemia, el crecimiento del empleo por parte del sector minero formal creció a 227 406 empleos.

¹⁷ Minem, 2021.

Ilustración 10. Evolución del empleo 2011-2021¹⁸



3.3. Demanda de energía eléctrica de las empresas mineras

La industria minera es intensiva durante la etapa de producción, en mano de obra, maquinaria pesada y consumo de energía eléctrica. Este último depende de diferentes factores, tales como las dimensiones de la mina (extensa o reducida) o la forma de explotación minera en el territorio (a cielo abierto o subterráneo). Además, si las operaciones mineras son subterráneas el uso de electricidad será mayor y la producción será por lixiviación o flotación. En general, la producción es por flotación; por ende, la demanda eléctrica es más intensiva. Por último, si la ley del mineral disminuye, se necesitará una mayor cantidad de energía para la realización del proceso.

Según Osinergmin, durante el primer trimestre del año 2019, la actividad de mayor consumo eléctrico del Perú fue la minería, que demandó el 32 % de las ventas de energía del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN). Para el marzo de 2019, el consumo de la minería significó el 55 % de los clientes libres de energía eléctrica del Perú.

El consumo de energía eléctrica de las mineras revisadas y analizadas se clasifica como de clientes libres. Cabe recordar que la ley para el consumo seguro y eficiente es la Ley N.º 28832, que define a los consumidores que tengan un consumo mayor o igual 2,5 MW, se les denomina clientes libres; y, si los consumos están dentro del rango de 0,2 MW - 2,5 MW, el cliente podrá escoger si es cliente regulado o libre.

¹⁸ Minem, 2021.

Los clientes libres no son dependientes a precios por potencia y energía; por ello, tienen la autonomía para comercializar de forma directa con las empresas que se encargan de suministrar o generar la energía eléctrica.

En los últimos seis años, la demanda de energía por parte de las mineras se incrementó considerablemente, ya que por esos años entraron en funcionamiento proyectos mineros importantes como Toromocho, Constanza, Las Bambas o la ampliación de Cerro Verde.¹⁹

En términos de potencia, a marzo del año 2019, 32 empresas concentraron rangos diferentes de potencia contratada del sistema eléctrico nacional.

Tabla 8. *Potencia contratada por mineras*

Rango de potencia contratada	Número de usuarios	Potencia contratada (MW)
> 100 MW	7	1000,89
<50, 100]	1	90,00
<20, 50]	14	444,45
<10, 20]	9	137,00

Fuente: Osinergmin, 2019, p. 6.

Asimismo, a marzo de 2019, la empresa minera obtuvo una demanda energética de 1 343,38 MWh.

Tabla 9. *Ventas de energía eléctrica por empresa minera a marzo 2019*

Empresa minera	Consumo energía (MWh)	Suministrador	Porcentaje (%)
Cerro Verde	295 544,92	Electroperú, Kallpa,	22
Las Bambas	107 470,88	Enel Generación	8

¹⁹ Osinergmin, 2019.

Shougang Hierro Perú	67 169,30	Enel Generación	5
Xstrata Tintaya	67 169,30	Kallpa	5
Southern Cooper Perú	188 074,04	Electroperú, Kallpa	14
Minera Antamina	80 603,16	ENGIE	6
Minera Chinalco Perú	67 169,30	Enel Generación	5
Otros	470 185,10		35

Fuente: Osinergmin, 2019. p. 6.

3.3.1. Plazos de contratación

Debido a la sobre oferta en la generación de energía eléctrica, la vigencia de los plazos de contratación con los clientes libres, en los últimos 2 años han disminuido.

Tabla 10. *Contratos con clientes libres sector minería 2019*

Años	Total de contratos	Porcentaje (%)	Contratos con el generador	Contratos con el distribuidor
<=1 año	11	6	8	3
<1, 2]	3	1	1	2
<2, 5]	61	37	29	32
<5, 10]	56	34	52	4
<10, 15]	19	11	18	1
> 15	14	8	14	0
Total	164	100	122	42

Fuente: GIZ & Samienergy, 2021, p. 48.

3.3.2. Análisis por zonas del consumo eléctrico de las mineras

3.3.2.1. Zona norte

Los departamentos que son parte de este sector son: Piura, Lambayeque, La Libertad y Cajamarca. Hasta junio de 2019, en estos territorios se encontraron 26 unidades mineras. La producción de mineral de estas unidades está relacionada en mayor medida con el oro y la plata. A un nivel de producción menor están el cobre, zinc y plomo.

Yanacocha, Gold Fields y Miski Mayo son las mineras destacadas que desarrollan sus operaciones en este territorio. En el año 2019, el consumo eléctrico de la minera Yanacocha alcanzó el 53 % del total de energía demandada en esta zona. Asimismo, en el mismo año, ENGIE y Kallpa alcanzaron 810 GWh de ventas en energía; de esta forma, se convirtieron en las compañías mineras con los principales suministros de energía eléctrica.

Tabla 11. *Demanda de potencia y energía, 2019*

Empresa minera	Demanda energía (GWh)	Demanda potencia (MW)
Gold Fields La Cima	148	20
Compañía Minera Miski Mayo	100	14
La Arena	26	3
Minera Yanacocha	426	57
Minera Aurífera Retamas	94	14
Consorcio Minero Horizonte	16	5

Fuente: COES, 2020

3.3.2.2. Zona centro

Los departamentos que agrupa este sector son: Ancash, Lima, Pasco, Junín, Huánuco y Huancavelica. A junio de 2019, estas registraron 63 unidades mineras de carácter polimetálico. Resaltan minerales extraídos como zinc, plata, plomo y cobre. Las principales mineras que operan en esta zona son Volcán, Antamina, Chinalco, Milpo y Buenaventura. Estas generan la demanda de energía eléctrica en un 79,8 % del total de clientes libres, con una demanda total de energía eléctrica el año 2019 de 3 717 GWh. Por su robustez en su infraestructura eléctrica, esta zona representa confiabilidad en su abastecimiento.

Para el sector minero, los suministradores primordiales de energía eléctrica que permiten el desarrollo de las actividades son las siguientes:

Tabla 12. *Empresas suministradoras de energía para la actividad minera*

Empresa minera	Suministradora de energía eléctrica
Compañía Minera Volcán	ENGIE
Compañía Minera Antamina	ENGIE
Nexa Resource (Milpo)	Electroperú
Compañía Minera Buenaventura	Huanza
Shougang Hierro Perú	Enel Generación Shougeza
Minera Chinalco	Enel Generación

Fuente: GIZ & Samienergy, 2021, p. 51.

Tabla 13. *Demanda de potencia y energía centro, 2019*

Empresa minera	Demanda energía 2019 GWh	Demanda potencia 2019 MW
Casapalca	92	14
Minera Los Quenuales	93	12
Doe Run	56	9
Minera Volcán	567	80
Sociedad Minera Corona	69	9
Compañía Minera Argentum	48	6
Minera Antamina	984	128
Minera Chinalco	924	115
Minera Milpo	285	37
Sociedad Minera El Brocal	282	38
UM El Porvenir	112	14
Minas Buenaventura (Uchucchauca)	188	24
Minas Buenaventura (Julcani)	17	2
Total	3 717	489

Fuente: COES, 2020

3.3.2.3. Zona sur

Los departamentos que engloba este sector son: Ica, Ayacucho, Apurímac, Cusco, Moquegua, Arequipa, Puno y Tacna. En estos lugares se registran 52 unidades mineras al mes de junio de 2019, en las que resalta la producción de cobre, plata y plomo. Las principales unidades mineras son Constancia (Hudbay Perú), Ferrobamba (Minera Las Bambas), San Rafael (Minsur), Cerro Verde, Antapaccay, Toquepala y Cuajone (Southern Perú). Asimismo, Kallpa, Electroperú y Enel poseen una demanda total en energía eléctrica el año 2019 con 8 826 GWh; por lo cual, se convierten en las empresas mineras con mejores suministros de energía eléctrica.

Tabla 14. *Demanda de potencia y energía sur, 2019*

Empresa minera	Demanda energía 2019 GWh	Demanda potencia 2019 MW
Shougang Hierro Perú	477	68
Southern Perú Cooper	2 178	294
Minera Cerro Verde	3 045	428
Minera Antapaccay	797	120
Hudbay Perú	718	92
Las Bambas	1 166	139
Mineras Ares Cotaruse	221	28
Minsur	148	26
Minas Buenaventura	66	10
Total	8 826	1 205

Fuente: COES, 2020

3.3.3. Ventas de energía eléctrica a las empresas mineras

El desarrollo en los últimos años de los precios de barra y el costo marginal de los clientes libres experimentaron cambios. En el periodo 2009 – 2015, los precios del mercado libre ascendieron favorablemente de 50 a 60 USD/MWh; del 2015 al 2020, los precios en los clientes libres bajaron de 60 a 40 USD/MWh, debido a la sobre oferta en la generación.

Por un lado, durante la última década, los precios regulados de los precios de barra se elevaron paulatinamente de 38 USD/MWh a 60 USD/MWh, debido principalmente a los sobrecargos del peaje principal (FISE, FOSE, RER y otros). Es importante recordar que la tarifa al usuario final está compuesta por energía/potencia (50 % a 60 %), peaje (20 % a 25 %) y otros cargos (20 % a 25 %). Por otro lado, los costos marginales desde el 2009 al 2020 han ido bajando de 40 USD/MWh a 10 USD/MWh, debido a una sobre oferta en el mercado de generación.

Tabla 15. Precio medio de mercado libre por empresa minera a enero del año 2020

Empresa minera	Consumo energía (MWh)	Suministrador	Precio medio USD/MWh
Cerro Verde	295 544,92	Electroperú	39,2
		Kallpa	65,9
		ENGIE	43,6
Las Bambas	107 470,88	Enel Generación	39,7
Shougang Hierro Perú	67 169,30	Enel Generación	44,3
		Shougesa	37,3
Xstrata Tintaya	67 169,30	Kallpa	43,1
Southern Cooper Perú	188 074,04	Electroperú	54,1
		Kallpa	50,7
Minera Antamina	80 603,16	ENGIE	65,8
Minera Chinalco Perú	67 169,30	Enel Generación	45,9

Otros	470 185,10	-	-
-------	------------	---	---

Fuente: GIZ & Samienergy, 2021, p. 51.

3.3.4. Cartera de proyectos mineros a largo plazo

La minería tiene un rol predominante en el contexto económico y social peruano, pues tiene reservas muy grandes de minerales como plata, cobre, oro, molibdeno y otros. Durante los últimos 10 años, en tiempos de bonanza y periodos de pandemia (COVID-19) fue un eje muy importante en la economía, ya que aportó ingresos fiscales, exportaciones y empleos, además de mantenerse con un crecimiento considerable. En consecuencia, gracias a los ingresos del sector minero, se fortaleció el desarrollo económico, tecnológico y social en el Perú.

Con esta perspectiva, el Minem y sus diferentes direcciones tuvieron que fomentarla, en el transcurso de los años, con un marco jurídico que motive a los capitalistas a contribuir al progreso de las inversiones futuras de la minería. Así, la cartera de proyectos mineros se divide en dos etapas: la construcción de yacimientos mineros y la exploración minera.

En la segunda etapa mencionada, la presente cartera comprende proyectos que buscan descubrir depósitos nuevos de minerales (Greenfield) y otros que pretenden la ampliación de reservas o depósitos que ya existen (Brownfield). Habría que anotar que estos proyectos tienen que cumplir con el estudio de impacto ambiental. La cartera de exploración minera 2020 comprende más de 64 proyectos mineros, con una inversión global de 498,6 millones USD.

Podemos destacar algunas inversiones en exploración; por ejemplo, el proyecto cuprífero Chapitos y Zafranal en Arequipa con un monto de inversión de 83 y 47 millones de USD, respectivamente; el proyecto Pampa Negra ubicado en Moquegua con una inversión de 45 millones USD.

En proyectos de construcción para la exploración de cobre, el monto de inversión distribuido en 18 proyectos fue de 262 millones de USD con la finalidad de la edificación de nuevas minas (Greenfield) y la ampliación o modificación de minas existentes (Bronwfield). Los proyectos Greenfield (45) implican el 79 % del total de los proyectos, cuya inversión fue de 391,7 millones de USD. Por otro lado, los proyectos Bronwfield (19) son el 21 % con una inversión de 106,9 millones de USD.

Tabla 16. Cartera de proyectos mineros de cobre

Puesta en marcha	Proyecto	Operador	Producto final	Monto mill. USD
2021	Mina Justa	Marcobre	Cu	1 600
2022	Ampliación Toromocho	Chinalco Perú	Cu	1 355
2025	Quellaveco	Anglo American	Cu	5 300
	Chalcobamba fase I	Las Bambas	Cu	130
	Pampacancha	Hudbay Perú	Cu	70
	Planta de Cu Río Seco	Río Seco	Cu	350
	Magistral	Nexa Resources Perú	Cu	490
2026	Zafranal	Zafranal	Cu	1 263
2027	Trapiche	El Molle Verde	Cu	973
	Los Chancas	Southern Perú	Cu	2 600
2028	Michiquillay	Southern Perú	Cu	2 500
>2029	Ariana	Ariana Operaciones	Cu	125
	Tía María	Southern Perú	Cu	1 400
	Cañariaco (norte)	Cañariaco Copper Perú	Cu	1 437
	Quechua	Quechua	Cu	1 290
	Río Blanco	Río Blanco Copper	Cu	2 500
	Antilla	Panoro Apurímac	Cu	250
	Cotabambas	Panoro Apurímac	Cu	1 530
	Don Javier	Jounefield Group	Cu	600
	El Galeno	Lumina Copper	Cu	3 500
	Huaquirá	Antares Perú	Cu	1 860
	La granja	Río Tinto	Cu	5 000
	Los Calatos	Hamptom Perú	Cu	655
	Pukagaga	Nexa Resources Perú	Cu	665

Fuente: Minem, 2021.

3.4. Evaluación de la intensidad energética en la producción de cobre del país

A pesar de los avances tecnológicos globales, la industria minera en Perú enfrenta desafíos con respecto a la eficiencia energética. Estos retos incluyen la necesidad de continuar invirtiendo en tecnologías más eficientes y adoptar prácticas más sostenibles en el uso de la energía. La evaluación constante de la intensidad energética en la producción de cobre, la implementación y ejecución de políticas y regulaciones que permitan y promuevan la adopción de medidas de eficiencia energética en la industria minera son clave para continuar con la mejora de la actividad minera del Perú para alcanzar su sostenibilidad.

Un indicador importante para medir el consumo eléctrico por unidad de volumen producido es la intensidad energética. Por esa razón, es importante tener en cuenta que este valor es variable, pues está enlazado a diversos factores como el tipo y calidad del mineral (ley del mineral), la tecnología empleada durante la producción, la fuente de energía utilizada para generar la electricidad, entre otros. Además, este valor solo se refiere a la intensidad energética eléctrica y no incluye la energía consumida por otros combustibles fósiles utilizados en el proceso de producción.

La importancia de tener referencias sobre la intensidad energética eléctrica empleada para producir el concentrado de cobre es significativa. El año 2020, este producto representó el 57,4 % del PBI minero metálico,²⁰ por lo que la producción del concentrado y el consumo de energía eléctrica (aproximadamente el 80 % del consumo total del sector minería metálica del cobre) nos brinda datos referenciales e importantes para la evaluación de la intensidad de energía y su variación o evolución en la producción del cobre.

Tabla 17. Valores referenciales para la evaluación de la intensidad energética

Año	Producción cobre TMF	Energía consumida en el sector minería 100 % MWh	Energía consumida en el sector minería 80 % MWh	Intensidad energética promedio MWh/TMF
2010	1 247 184	8 014 786	6 411 829	5,141
2011	1 235 345	8 732 848	6 986 278	5,655
2012	1 298 761	9 016 739	7 213 391	5,554
2013	1 375 641	9 263 130	7 410 504	5,387

²⁰ Minem, 2020

2014	1 377 642	10 390 083	8 312 066	6,034
2015	1 700 817	10 525 918	8 420 734	4,951
2016	2 353 859	14 665 395	11 732 316	4,984
2017	2 445 584	15 203 455	12 162 764	4,973
2018	2 437 035	15 841 516	12 673 212	5,200
2019	2 455 440	16 099 295	12 879 436	5,245

Fuente: Minem

La evaluación de la intensidad energética en la producción del cobre en Perú muestra que la industria minera en el país ha logrado mejorar intermitentemente su eficiencia energética en los últimos años. Según los datos de la tabla, los valores referenciales de la intensidad energética han ido variando irregularmente. Esta mejora en la eficiencia energética se ha logrado gracias a una serie de iniciativas y tecnologías implementadas por las empresas mineras en el país, como la adopción de equipos más eficientes, la optimización de los procesos productivos y la utilización de fuentes de energía renovable. Además, en los últimos años, la producción de cobre en Perú se incrementó de gran manera, lo que hace aún más destacable la reducción de los niveles de intensidad energética en la producción de concentrado de cobre.

3.5. Desafíos y barreras para la mejora de la eficiencia energética en la minería del cobre en el Perú

La promoción del uso eficiente de la energía (UEE) es considerada una tarea de importancia nacional para proteger y garantizar el abastecimiento energético, salvaguardar a los consumidores, mejorar la competitividad en el sector económico del país y disminuir los efectos ambientales adversos de la utilización y el consumo de energía. Así lo señala la Ley N° 27345, Ley de Promoción del Uso Eficiente de la Energía, publicada en el año 2000. Años después, en el 2007, con la publicación del Decreto Supremo N.º 053-2007-EM, se reglamenta la Ley N.º 27345 y se dictamina que el Minem es el organismo responsable de ejecutar programas orientados a mejorar la eficiencia energética en los sectores residencial, industrial y servicios, sector público y sistema de transporte. A partir de este marco general en eficiencia energética, la estrategia a nivel macro del Perú viene determinada por los diferentes planes y políticas

gubernamentales publicadas a lo largo de los últimos años, a fin de lograr la ejecución de los objetivos trazados en la Ley N.º 27345.

3.5.1. Barreras

Las barreras son situaciones del mercado donde se limitan las expectativas económicas de muchos proyectos, por lo que se obtienen resultados económicos muy por debajo de lo óptimo.²¹

3.5.1.1. Regulatorias

a. La implementación del DS N.º 022-202-EM. Se ha implementado un decreto que aborda la infraestructura de carga y el suministro de energía para la movilidad eléctrica en el Perú. Esta medida busca combatir la informalidad y la contaminación en el transporte mediante la adopción de vehículos eléctricos, que poseen mayor eficiencia y emiten menos gases contaminantes. Es un trabajo de gran escala, porque desarrolla un sistema de transporte más limpio y sostenible, que, además, permite la disminución de la polución y contaminación del aire y la mitigación de las consecuencias por el cambio climático. Asimismo, promueve la eficiencia energética y la diversificación de la matriz energética al impulsar la utilización de energía eléctrica en el transporte. De esta forma, se busca alcanzar un nivel mínimo en la dependencia de los combustibles fósiles.

3.5.1.2. Económicas y de mercado

a. En la actualidad, por la sobreoferta de energía eléctrica en el corredor norte y sur del Perú, no habría necesidad de inversión de nuevos proyectos energéticos, pero este escenario cambiaría por la evolución sostenible de nuevos proyectos mineros, los cuales en un futuro requerirán de mayor generación de energía RER. No obstante, estos proyectos se verían afectados si se tomara la decisión de culminar el gasoducto sur peruano para el periodo 2027-2028, ya que el gas ofrece una fuente de confiabilidad alta y las mineras optarán por la misma.

b. Si los gastos de capital (capex), necesarios para el ingreso y la ejecución de nuevas tecnologías en las empresas mineras, fuera muy elevados, esto podría desalentar su adopción. El alto costo asociado a la inversión en nuevas tecnologías

²¹ GIZ & Samienergy, 2021

podría resultar desmotivador para las mineras, lo que dificultaría el proceso de adopción.²²

c. Si se implementa una solución tecnológica, es posible que los costos de operación (OPEX) aumenten. Por ejemplo, podría ser necesario contratar más personal operativo, lo que generaría gastos de operación adicionales y encarecería los costos.

d. El extenso periodo de retorno del capital de inversión en las tecnologías de eficiencia energética. Este lapso de tiempo generalmente se considera para una inversión de este tipo.

e. La falta de tecnologías eficientes y asequibles a las condiciones del mercado minero.

f. La falta de programas de financiamiento para los proyectos de EE que puedan lograrse en parte por los mismos participantes del proyecto (a través de reembolso del préstamo, pagos de *leasing*, entre otros).

3.5.1.3. Políticas e institucionales

a. El estado, a través de los mecanismos financieros de los que dispone, podría promover el conocimiento de tecnologías innovadoras para una mejor eficiencia energética en la industria, así como desarrollar capacidades y habilidades asociadas a estos conocimientos.

b. Los objetivos para lograr la reducción de las emisiones de los GEI del sector de energía se han planificado desde el sector público, pero no se ha hecho visible la participación en inversión de EE del sector minero. Por lo tanto, es crucial que este último impulse sus programas de EE para contribuir a la sostenibilidad y competitividad del sector minero, y así alinearse con los objetivos del país.

c. La incertidumbre política, social y económica puede tener un impacto negativo en las inversiones mineras; en especial, cuando se producen cambios abruptos en las reglas de inversión y en las políticas gubernamentales. Estos cambios pueden desalentar las inversiones en el sector minero y, en consecuencia, afectar la implementación de nuevas tecnologías en eficiencia energética (EE).

d. El sector académico desempeña un rol decisivo en la sociedad al generar conocimientos y ser un elemento clave en el diseño de soluciones innovadoras que superen las capacidades de la industria. Es esencial que este conocimiento se transmita a los estudiantes y profesionales que forman parte de los centros de investigación, instituciones técnicas y universidades relacionadas con el sector minero.

²² Centro de estudios del cobre y la minería [Cesco], 2020

3.5.1.4. Técnicas

a. Tecnologías poco robustas: existen soluciones con tecnologías implementadas poco maduras, las cuales pueden fallar a la hora de su implementación, por lo que son poco confiables.

b. Para implementar una tecnología en particular se necesita haber experimentado otra tecnología previa, por lo que su desarrollo no sería muy rápido.

c. La masificación de la tecnología en la industria minera aún está en fase experimental, lo que genera cierta cautela por parte de las empresas a la hora de invertir en nuevas tecnologías sin que se haya demostrado su efectividad. En este sentido, la industria minera realiza un seguimiento de las tecnologías innovadoras para asegurarse de que hayan sido probadas y aprobadas por otras empresas antes de su implementación. Además, es necesario reconocer que las tecnologías deben pasar por rigurosos procesos de prueba y validación antes de ser ampliamente adoptadas por la industria minera. Esto garantiza que las soluciones tecnológicas sean efectivas, confiables y se ajusten a las necesidades específicas del sector.

3.5.1.5. Culturales

a. En la pirámide organizacional de las empresas mineras ya existe una cultura de cómo se hacen las cosas, por ende, se sienten cómodos. Al querer implementar nuevas tecnologías, se necesitará de un cambio organizacional y esto sería una barrera a dicho cambio.

b. La prioridad de la minería siempre será la producción ligada a la seguridad. Durante muchos años las estructuras mineras han funcionado así y no habría razón para innovación. Por lo que muchos promotores mineros de tecnologías nuevas han colisionado con culturas tecnológicas conservadoras.

c. Durante muchos años, en la minería siempre se pensó que no era posible desarrollar soluciones tecnológicas locales propias de cada región. Por lo que no solo se compite con innovaciones importadas de otros países, sino contra prejuicios heredados.

Capítulo 4

Acciones para mejorar la eficiencia energética en la minería del cobre en Perú

Con el fin de establecer un plan de acción para los programas de eficiencia energética en el sector minero del cobre, se han identificado las barreras energéticas y propuesto soluciones para optimizar el uso de los recursos energéticos. Estos planes implican mejoras operativas en la gestión de actividades, innovación tecnológica de los procesos y un cambio cultural en las prácticas, costumbres y tradiciones relacionadas con el uso eficiente del componente energético.

Para identificar las barreras y optimizar la eficiencia energética en Perú, se efectuó un análisis del panorama actual desde tres perspectivas: social-energética, regulatoria y contribución a la agenda de cambio climático.

Con base en esto, se han identificado los principales programas de eficiencia energética a desarrollar en Perú, tomando como referencia las medidas desarrolladas e implementadas por países latinoamericanos: Chile, Brasil, México y Colombia.

Tabla 18. *Tabla sintetizadora de los programas de EE en Latinoamérica*

Programas de EE desarrollados en países de la región

- a. Sistema de gestión de la energía - ISO 50001.
- b. Empresas de Servicios Energéticos – ESCO.
- c. Etiquetado de eficiencia energética para equipos energéticos.
- d. Estándares mínimos de eficiencia energética.
- e. Generación distribuida de energías renovables.
- f. Financiamiento de proyectos de EE.
- g. Premio o distinción nacional de EE.
- h. Vehículos eléctricos.

4.1. Implementación de programas de eficiencia energética

Partiendo del *benchmarking* desarrollado con cuatro países de la región y de las experiencias previas analizadas en el Perú, se priorizaron por su relevancia cuatro medidas de eficiencia energética que conforman la base para el estudio. Los

mecanismos y acciones para solucionar las barreras identificadas se han seleccionado tomando en cuenta los siguientes factores:

a. El fomento de las medidas de Eficiencia Energética comprenden decisiones concretas con inversión que generan ahorros de consumo.

b. Un impulso normativo que elimine barreras, desencadene las actuaciones de EE y, por tanto, potencie los resultados a conseguir, además de incrementar y acelerar la tasa de penetración de las actuaciones de EE.

4.1.1. Implementación del sistema de gestión de la energía ISO 50001 en el sector minero

La adopción y aplicación de una norma internacional que establece las exigencias para elegir, poner en práctica, conservar y perfeccionar un régimen de gestión de la energía en una empresa minera se denomina implementación del sistema de gestión de la energía ISO 50001 en el sector minero. Este tiene como objetivo mejorar la eficiencia energética, reducir los costos energéticos y minimizar el impacto ambiental relacionado con el consumo energético en el marco de las operaciones dentro de la mina. La implementación de la norma ISO 50001 implica la identificación de aspectos energéticos clave, el establecimiento de objetivos y planes de mejora, la implementación de medidas de ahorro energético, el seguimiento y medición del desempeño energético, así como la revisión y mejora continua del sistema de gestión de la energía. En resumen, la implementación de la norma ISO 50001 en el sector minero busca promover una gestión de carácter sostenible a nivel energético y que sea más eficiente durante las operaciones mineras.

4.1.2. Financiamiento para proyectos en eficiencia energética

La propuesta de financiamiento del Fondo Nacional de Eficiencia Energética (FNEE) será el apoyo de las iniciativas nacionales que tienen como objeto de trabajo la eficiencia energética. Este fondo será financiado estrictamente por capitales nacionales o habrá financiación externa. Asimismo, estará provisto de una cantidad anual para la implantación de medidas que permitan el ahorro de energía para alcanzar la eficiencia.

El objetivo es involucrar a las pymes en la gestión energética, al facilitar la inversión y una rentabilidad a más corto plazo en este tipo de actuaciones. Por otro lado, se pretende fomentar auditorías energéticas y mejoras tecnológicas disponibles no solo en las pymes, sino en cualquier empresa del sector industrial, todo con el objeto de la mejora de la competitividad.

Además, este plan impulsa un cambio de cultura en la toma de decisiones que le da valor no solo al tema productivo y económico, sino también al uso responsable de la energía que, además, le da importancia al periodo de retorno, así como al costo del ciclo de vida de las mejoras tecnológicas introducidas.

Todas las empresas que acojan este plan deberán reportar los datos de consumo, mediciones, variables significativas, etc., con el fin de que esta información pueda ser utilizada para planes futuros; por ejemplo, fijar indicadores y líneas base para la realización de benchmarking. Otra de las barreras a superar mediante este plan es el fomento del mercado de consultores, ya que se genera un nuevo nicho de mercado. Si se patrocina adecuadamente el fomento de la EE en la industria, se crearía un mercado de consultores de diferentes niveles: pymes, industria mediana y la gran industria como las mineras, quienes serían muy exigentes en la calificación de las cualidades de la empresa de consultoría sobre EE.

4.1.3 Impulso de las Compañías de Servicios Energéticos - ESCO

Actuación transversal para la promoción de las ESCO, entendidas como aquellas empresas que mejoran la eficiencia energética y recuperan las inversiones a través de los ahorros de energía.

Se espera que la estrategia sirva de catalizador para la expansión y sostenibilidad de la industria de servicios energéticos en desarrollo. Esto produciría una mayor creación de puestos de trabajo y acceso a los mismos, y el establecimiento y fortalecimiento de una cultura de eficiencia energética. Asimismo, con este plan se pretende el crecimiento de este tipo de empresas con concursos y actuaciones por parte del sector público —encaminados al fomento de estas en sus instalaciones—. De este modo, se obtendrá conocimiento y fiabilidad al trabajar para la administración pública, lo que facilitaría la creación de líneas de financiamiento de parte de la banca en proyectos públicos. Este plan supone la necesidad de profesionales formados y especializados en eficiencia energética para crear y efectuar estos proyectos.

El potencial de ahorro energético y de utilización de energías renovables debe estar presente en las empresas alineadas al plan. Dadas sus circunstancias, resulta prudente y ventajoso, desde el punto de vista financiero, desarrollar estrategias que fomenten el ahorro, la eficiencia energética y la integración de energías renovables en el marco de un «contrato de servicios energéticos» proporcionado por una ESCO. La penetración de estas compañías en el sector minero se daría a cambio de incentivos y de normas que ayuden a la simplificación en la puesta en marcha de sus plantas.

4.1.4. Desarrollo de la generación distribuida

Es un enfoque fundamental en la generación eléctrica que promueve fomentar la eficiencia, sostenibilidad y descentralización del sector, con lo que se garantizarían inversiones y líneas de financiamiento para las energías renovables.

La finalidad del programa de apoyo a la generación de electricidad desde el uso de energías renovables en infraestructuras o instalaciones conectadas es equiparar la generación de energía renovable con la energía convencional. Con ello, se lograría cambiar el esquema tradicional donde el usuario es un actor pasivo hacia un usuario que busca generar su electricidad con energías renovables y se convierte en un actor activo de este esquema.

La generación distribuida en el Perú solo se encuentra regulada a nivel de ley. No existen normas a nivel reglamentario que la desarrollen, razón por la cual a la fecha no se han implementado este tipo de proyectos.

La Ley N.º 28832 ha reconocido como beneficio a la generación distribuida la posibilidad de comercializar sus excedentes de energía al mercado de corto plazo y el uso de las redes de distribución pagando solo el costo incremental. Por su parte, el Decreto Legislativo N.º 1221 ha establecido que los usuarios del servicio público de electricidad que utilicen generación renovable pueden utilizar de estos excedentes para su consumo o para inyectarlos al sistema de distribución, si bien es necesario fijar un régimen de autoconsumo renovable definido. Las condiciones técnicas se detallarán en el reglamento.

4.2. Integración de fuentes de energías renovables en las operaciones mineras

4.2.1. Potencial de las energías renovables

La gran cantidad de recursos energéticos que consumimos provienen de recursos no renovables, los cuales están ubicados en superficies definidas y finitas. Estos recursos naturales almacenados se agotan y no pueden ser reemplazados en su consumo diario. Por tanto, la transición de la energía matriz a recursos de energías renovables (RER) es importante, ya que estas se van regenerando en su ciclo natural del planeta, de manera que dispondríamos de energía infinita.

a. Ventajas de su presencia para el medio ambiente: son de carácter infinito y no son generados de gases de efecto invernadero.

b. Seguridad energética: reduce el vínculo dependiente de energías no renovables y, con ello, la importación de las energías de restos fósiles

c. Desarrollo económico: son fuentes de desarrollo económico y contribuyen con mano de obra contratada sobre la población

d. Energías renovables: cada uno contribuye con una energía dependiente de su tecnología, fuerza motriz, calor y electricidad.

Tabla 19. Potencial de las energías renovables

Recurso	Tecnología	Elementos	Aplicación
Eólica	Generación	Aeronavegadores	Electricidad
	Fuerza motriz	Aerobombear	Fuerza
Solar	Celdas fotovoltaicas	Celdas solares	Electricidad
	Térmica	Colectores	Calor
	Pasiva	Paredes, ventanas, etc.	Calor
Hidráulica	Pequeñas centrales	Generador hidráulico	Electricidad
	Otros	Rueda	Fuerza

4.2.2. Energía Eólica

Esta se encuentra presente como energía cinética en las corrientes o masas de aire. Estas energías se pueden aprovechar con aeronavegadores para convertirlos principalmente en electricidad o fuerza motriz empleada en los molinos.

4.2.2.1. El Potencial de la energía eólica en el Perú

El potencial para las energías eólicas se encuentra, sobre todo, en la zona norte del país. La Libertad, Cajamarca y Piura son ideales para la generación eólica.²³

a. Datos históricos:

Senamhi: Encargada de medir los registros de los vientos a nivel nacional.

Corpac: Registra la velocidad y dirección de los vientos en los aeropuertos.

²³ Minem, 2016

b. Principales investigaciones elaboradas:

OLADE, 1983: estudio preliminar del mapa eólico del Perú, con registro de 48 estaciones.

Electroperú, 1980-1990: evaluación de los recursos eólicos en Malabrigo y Marcona.

MEM 2001: atlas de minería y energía en el Perú.

Minem, 2016: mapa eólico del Perú.

c. Documento de Atlas Eólico Final:

Se trata del documento que indica la metodología empleada en el estudio de los mapas eólicos del Perú a diferentes niveles de altura y su validación final que muestra el nivel del recurso eólico. Se estima que en el Perú existen 20 493 MW de recursos eólicos aprovechables.

d. Aplicación de la WebGIS del mapa eólico del Perú:

La aplicación de la WebGIS nos permite el estudio de las áreas más favorables para el desarrollo de los proyectos eólicos. La aplicación permite analizar en cada punto de un área del interés del usuario final:

- Datos de la ubicación (coordenadas), departamento, provincia, distrito, altitud.
- Datos del recurso eólico: velocidad y dirección del viento, densidad de potencia, distribución de frecuencias de velocidades (distribución de Weibull), temperatura media, presión media, humedad relativa y densidad del aire.
- Mapas de velocidad y densidad de potencia.
- Extracción de mapas topográficos y de rugosidad de las zonas de interés.
- Producción eólica para un modelo de aerogenerador genérico.

Tabla 20. Centrales Eólicas Interconectados al SEIN

N.º	Central de generación eólica	Lugar	Tecnología	Potencia instalada MW	Condición
1	Tres Hermanas	Ica, Marcona	Aeronavegadores	97,15	Operativo
2	Wayra I	Ica, Nazca	Aeronavegadores	132,3	Operativo
3	Parque Eólico Marcona	Libertad, Pacasmayo	Aeronavegadores	80,0	Operativo
4	Wayra Extensión	Ica, Nazca	Aeronavegadores	180	Operativo
5	Punta Lomitas	Ica	Aeronavegadores	260	Operativo
6	Duna y Huambos	Cajamarca, Chota	Aeronavegadores	18,4	Operativo

7	Talara	Piura, Pariñas	Aeronavegadores	30,0	Operativo
---	--------	----------------	-----------------	------	-----------

Fuente: Osinergmin

4.2.2. Energía Solar

El territorio peruano cuenta con una gran cantidad de energía solar, ya que el despliegue de la irradiación solar es continuo y óptimo durante varias horas del día en muchas localidades. Por eso, es muy atractivo masificar proyectos con energía solar.

a. Energía solar fotovoltaica:

La incidencia de la irradiación solar sobre paneles fotovoltaicos. Mediante un proceso fotoeléctrico es convertida en electricidad.

b. Energía solar fototérmica:

A través de secadores, termas y cocinas solares, la energía del sol es transformada en calor.

c. Usos de la energía solar:

- Electricidad para el sector residencial, comercial.
- Calentamiento de agua mediante termas solares.
- Calefacción de ambientes.
- Cocinas y hornos para el sector rural.
- Sistemas de desalinización y potabilización de agua.
- Secadores de productos agrícolas.
- Bombeo de agua e invernaderos.

d. Potencial de la energía solar:

Debido a su ubicación geográfica, el Perú posee un alto nivel de energía solar, por eso el Minam encargó la publicación de los mapas solares, cuyo estudio, investigación y publicación está encargado al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrológica (Senamhi). Su objetivo es cuantificar una herramienta importante para los proyectos de los interesados en explotar una energía sustentable e infinita.

Tabla 21. Estudio del Senamhi sobre energía solar

Zona	Localidad	Irradiación solar, promedio anual KWh/m2
Selva	Oriente	4,5 a 5,0
Costa	Norte	5,0 a 6,0
Sierra	Sur	5,5 a 6,5

Fuente: Ministerio de la producción, 2017.

Tabla 22. Centrales solares interconectadas al SEIN

N.º	Central de generación	Lugar	Tecnología	Potencia instalada MW	Estado
1	Majes Solar	Caylloma, Arequipa	Paneles fotovoltaicos	20,0	Operativo
2	Solar Repartición	Caylloma, Arequipa	Paneles fotovoltaicos	20,0	Operativo
3	Tacna Solar	Tacna, Tacna	Paneles fotovoltaicos	20,0	Operativo
4	Panamericana Solar	Mariscal Nieto, Moquegua	Paneles fotovoltaicos	20,0	Operativo
5	Moquegua FV	Mariscal Nieto, Moquegua	Paneles fotovoltaicos	16,0	Operativo
6	Rubí	Mariscal Nieto, Moquegua	Paneles fotovoltaicos	144,8	Operativo
7	Intipampa	Mariscal Nieto, Moquegua	Paneles fotovoltaicos	40,0	Operativo

Fuente: Osinergmin

e. El Sector minería y la matriz energética solar:

Las empresas mineras están cada vez más conscientes de la minimización de los costos de la energía renovable (RER) y de su confiabilidad. Las compañías dedicadas al rubro de la energía se esfuerzan por garantizar un suministro confiable de energía al sector minero y, para ello, están trabajando en el desarrollo de baterías

inteligentes de alta capacidad para el almacenamiento energético, las cuales están disponibles en el mercado.

Algunas personas dudan de la fiabilidad y la intermitencia de la energía solar. ¿Cuál es la verdad detrás de esta afirmación? ¿Acaso se trata simplemente de incorporar nuevas tecnologías que superen estos inconvenientes?

La energía solar es una tecnología que se ha estado implementando desde hace más de 15 años. El almacenamiento de energía ha surgido como una alternativa para hacer frente a la intermitencia durante las horas nocturnas, cuando no hay sol, lo que asegura la estabilidad y continuidad del suministro de energía en todo momento.

4.2.3. Energía hidroeléctrica

La obtención de energía a través del recurso hídrico representa una energía RER, limpia, sostenible y segura. El Perú tiene disponibilidad de cuencas hídricas para ser aprovechadas y disponer de energía hidroeléctrica. Países como el Brasil están interesados en elaborar proyectos para el estudio de centrales hidroeléctricas. Cabe mencionar que, para minicentrales, con < 20 MW son consideradas energías RER.

a. Potencial hidroeléctrico:

Los primeros estudios hidroenergéticos en el Perú fueron emprendidos por el Ministerio de Energía y Minas (Minem), Electroperú y la Misión Técnica Alemana en los años 80; se calculó una potencia de 58 GW.²⁴ Estos estudios fueron la base de decisiones de proyectos por Electroperú, organismo encargado de la expansión de proyectos hidroeléctricos.

El examen preliminar del potencial hidroeléctrico (HidroGIS) del Minem - Halcrow Group se completó en 2011. En el marco de este proyecto, se creó el Atlas del Potencial Hidroeléctrico del Perú.

b. Resultados de los avances de la investigación:

- Con la ayuda de una plataforma SIG, que permite una valoración geográfica bajo numerosos tipos de información, se determinó el potencial hidroeléctrico teórico y técnico de Perú.

- La adquisición de las capas temáticas necesarias para reproducir las características físicas y socioeconómicas de las cuencas, tales como el terreno, la

²⁴ Autoridad Nacional del Agua. Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos [ANA], 2014

red hidrográfica, la situación demográfica, los espacios naturales protegidos, las regiones de concesión hidroeléctrica, etc., fue posible gracias a la plataforma SIG.

- Evaluación de sistemas de planilla de cálculo para la obtención del potencial hidroeléctrico teórico y técnico de las cuencas en estudio.

- Desarrollo de los mapas de los potenciales hidroeléctricos teóricos y técnicos, a nivel nacional, regional y por cuenca. Estos incluyen los costos y beneficios utilizados para la ponderación de la factibilidad de aprovechamiento.

Tabla 23. Potencial (P) hidroeléctrico técnico del Perú

Vertiente	P Teórico MW	P Técnico MW	P técnico concesión y área restringida MW	P técnico solo áreas restringidas MW	P técnico solo concesión MW	P técnico aprovechable MW
Pacífico	11 738	11 402	174,6	1574	922	8731
Atlántico	102 968	86 971	360,61	23 244	2 740	60 627
Titicaca	110	87				87
Totales	114 816	98 460	535.21	24 818	3 662	69 445

Fuente: Minem, DGE. Potencial de energías renovables en el Perú 2011

c. Con cuánta energía contamos:

Hasta el año 2008, la capacidad nacional instalada era de 7 158 MW, de los cuales el 45 % (3 235 MW) correspondía a la energía hidráulica y el 55 % (3 923 MW), a la energía térmica. El 83 % de la energía correspondía al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) y el resto de capacidad instalada 17 %, a los sistemas aislados.

d. Expansión energética nacional de energía hidroeléctrica del SEIN:

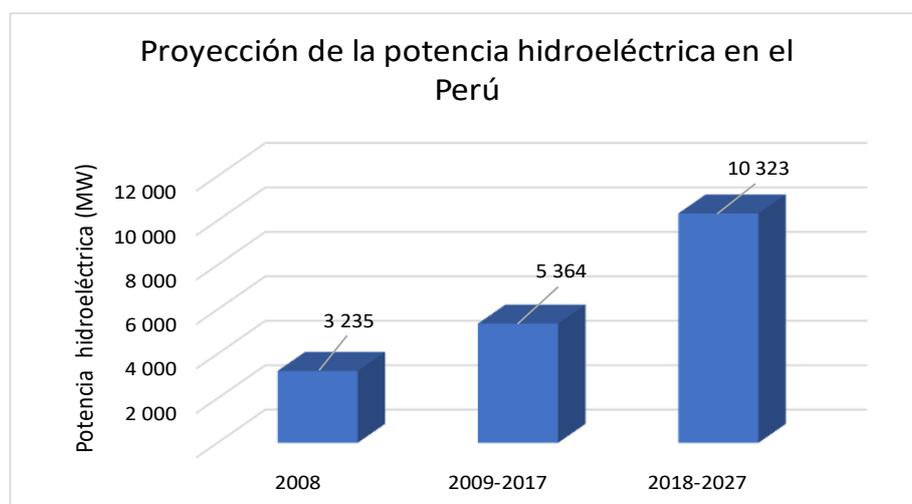
Con todos los proyectos encaminados y con la posibilidad de ser ejecutados el SEIN tiene las siguientes consideraciones en su plan de expansión energético:

- Un incremento de la capacidad instalada de 5 364 MW al 2008-2017 en energía hidroeléctrica.

- Para el periodo 2018-2027 se estima tener una oferta de generación de 5 274 MW en energía hidroeléctrica.

- La inversión aproximada para la realización del proyecto de expansión de la generación energética sería de 13 524 millones de dólares.

Ilustración 11. *Proyección de la potencia hidroeléctrica²⁵*



El Perú tiene la mayor cantidad *per cápita* de agua dulce renovable en América Latina. La selva tropical tiene más del 80 % de recursos hídricos.

Tabla 24. *Centrales hidroeléctricas, subasta RER, con interconexión al SEIN*

N.º	Central de generación C. H.	Lugar	Tecnología	Potencia Instalada MW	Estado
1	Yarucaya	Lima, Huaura	Turbina Francis	17,5	Operativo
2	Potrero	Cajamarca, San Marcos	Turbina Francis	19,9	Operativo
3	Rucuy	Lima, Huaral	Turbinas Pelton	20,0	Operativo
4	Chancay	Lima, Huaral	Turbinas Pelton	19,2	Operativo
5	Chancayllo	Junín, Jauja	Turbinas Francis	5,26	Operativo
6	Runatullo II	Junín, Concepción	Turbinas Pelton	19,1	Operativo
7	Runatullo III	Junín, Concepción	Turbinas Pelton	20,0	Operativo
8	Las Pizarras	Cajamarca, Santa Cruz	Turbinas Francis	18,0	Operativo

²⁵ ANA, 2013, p.105.

9	Yanapampa	Ancash, Ocos	Turbinas Francis	4,13	Operativo
10	Huasahuasi I	Junín, Tarma	Turbinas Francis	10,0	Operativo
11	Huasahuasi II	Huasahuasi II	Turbinas Francis	10,0	Operativo
12	Nuevo Imperial	Lima, Cañete	Turbinas Francis	3,97	Operativo

Fuente: Osinergmin

e. Mineras que han construido minicentrales hídricas:

La energía eléctrica es un recurso de gran escala en la actividad minera: muchas de las minas han construido centrales de generación propias renovables (RER) y térmicas. Una gran parte de estos proyectos son minicentrales (< 20 MW) y son sistemas, en su mayoría, aislados.

En la publicación del *Anuario minero 2018* se establece que 14 mineras a nivel nacional han implementado minicentrales hidroeléctricas con un total de 114,4 MW como potencia efectiva, que corresponde solo al 0,88 % de la potencia instalada en el SEIN. Esto da una clara idea de que es un recurso energético muy poco explorado del sector minero nacional.

Tabla 25. *Empresas mineras con generación hidroeléctrica propia de RER*

N.º	Empresa	Central de generación C. H.	Sistema	Potencia instalada MW	Estado
1	Compañía Minera Poderosa	El Trigo	Aislado	1,7	Operativo
2	Compañía Minera Raura	Cashaucro	Aislado	4,1	Operativo
3	Compañía Minera Santa Luisa	Huallanca Nueva	Aislado	4,3	Operativo
		Palca	Aislado	1,0	Operativo
4	Compañía de Minas Buenaventura	Huancarama	Aislado	3,9	Operativo
5	Compañía Minera volcán	Huapa	Aislado	0,9	Operativo
		Ingenio Paton	Aislado	1,3	Operativo
				3,5	Operativo

		Tucsipampa	Aislado	1,3	Operativo
		Baños I	Aislado	1,2	Operativo
		Baños II	Aislado	0,9	Operativo
		Baños III	Aislado	1,0	Operativo
		Baños IV	Aislado	4,9	Operativo
		Baños V	Aislado	9,2	Operativo
		Cacray	Aislado	0,2	Operativo
		Francois	Aislado	0,2	Operativo
		Huanchay	Aislado	2,0	Operativo
		San José	Aislado	2,2	Operativo
		Shangua	Aislado	1,1	Operativo
		Tingo	Aislado	-	Operativo
		Yanahuin	Aislado	0,5	Operativo
6	Compañía Minera San Ignacio	Monobamba	Aislado	11,5	Operativo
7	Compañía Minera San Valentin	Lispay	Aislado	3,8	Operativo
8	Consorcio Minera Horizonte	Pías 1	SEIN	12,6	Operativo
9	Empresa Minera Los Quenuales	Rapaz 2	Aislado	1,27	Operativo
		Chaprin	Aislado	5,4	Operativo
10	Nexus Resources	Marcapampa	Aislado	1,2	Operativo
		Candelaria	Aislado	4,7	Operativo
		Jupayragra	Aislado	1,9	Operativo
11	Sociedad Minera El Brocal	Río Blanco	Aislado	1,4	Operativo
		Sacsamarca	Aislado	0,2	Operativo
		Yauli	Aislado	0,8	Operativo
12	Southern Perú Cooper	Cuajone	Aislado	9,0	Operativo
		San Judas	Aislado	0,9	Operativo
13	ICM Pachapaqui	Tadeo	Aislado	0,9	Operativo
		San Martin de Porres	Aislado	1,6	Operativo
14	Castrovirreyna compañía minera	Santa Inés	Aislado	1,0	Operativo
Subtotal 1				103,2	

		Minería no metálica			
15	Unión Andina de Cementos	Carpapata I	SEIN	5,6	Operativo
		Carpapata II	SEIN	6,3	Operativo
		Carpapata III	SEIN	12,8	Operativo
Subtotal 2				24,7	
Total				127,9	

Fuente: GIZ & Samienergy, 2021. Análisis del potencial y eventuales actuales usos que tienen las fuentes alternativas en la minería peruana.

4.3. Tecnologías y prácticas de eficiencia energética aplicables a la producción del cobre

La pandemia fue el impulso de la minería para dar saltos obligados a una transformación digital. La industria mundial está sufriendo cambios vertiginosos en su tecnología y, por ende, la minería tiene que ir a esa velocidad. La digitalización es fundamental para ganar eficiencia en los procesos de la minería. Los gastos adicionales que implican desarrollar e implementarla se verán retribuidos con resultados reales de menor gasto de energía, mayor producción, seguridad y sostenibilidad en el medio ambiente.

El primer desafío de la minería es la conectividad mediante fibra óptica, equipos, maquinarias y personas; para así lograr un centro de operaciones centralizado de donde se pueda monitorear de un solo lugar o hacerlo en forma remota. El modelo de la predictibilidad, sustentado mediante aplicaciones o *software* que integran toda un área de requerimiento en tiempo real, busca hacer un seguimiento virtual y optimizar todos los procesos. Además, de estos modelos de innovación tecnológica podemos citar algunos otros como: inteligencia artificial (IA), internet de las cosas (IoT), gemelos digitales (DT), solución en la nube (CS) y *big data*.

4.3.1. Buenas prácticas para el uso de energía

El progreso de la humanidad y el avance mundial son resultados positivos de la utilización de la energía. Durante muchos años, la industria hizo uso irracional de la energía, el Perú no es ajeno a esto. Por tal, es importante fomentar en el sector minero las buenas prácticas del uso de la energía. En su labor de aglutinar una mayor

producción y que esta no pare, la industria minera resta importancia a las posibles anomalías del proceso de producción. Justamente, muchas veces estas anomalías originan derroches energéticos que hacen que el proceso de producción no sea eficiente y, en consecuencia, se eleven sus costos. Estas situaciones atípicas pueden ser identificadas por el desgaste de las máquinas, los equipos u otros accesorios que se encuentran en la mina.

Todos los procesos de los sectores minero e industrial emplean técnicas adecuadas de ahorro energético, las cuales varían en función del volumen de inversión. La buena práctica de bajo nivel de inversión viene relacionada con la capacitación de los trabajadores; aplicación de manuales de operación; buen uso de los equipos; mínimas transformaciones en la planta que no están relacionados con la faena misma (iluminaria, aislación, etc.) y que el consumo energético, además de aportar beneficios económicos a la empresa y al medio ambiente. Mientras tanto, las prácticas que implican una gran cantidad de inversión están vinculadas directamente con mayores procesos productivos, lo que incluye un recambio tecnológico, mejoras en los sistemas de control y otros. Generalmente estas medidas vienen relacionadas con una evaluación energética por parte de la empresa.

Dentro de la perspectiva de los equipos relacionados con la minería, para las mejoras y potenciales de ahorro de energía tenemos (tomando como modelo del manual de eficiencia de Donald R. Wulfinghoff).²⁶

Tabla 26. *Motores mejoras energéticas y potenciales ahorros de energía*

	Mejora de eficiencia energética	Potencial de ahorro	Periodo de retorno	Inversión USD
1	Reemplazar motores de eficiencia estándar por motores de alta eficiencia.	10 a 20 %	Más de 1 año	5 000 a 30 000
2	En proyectos nuevos o ampliaciones, evitar el sobredimensionamiento de los motores para la compra de motores nuevos, verificar que sean de alta eficiencia.	10 a 20 %	Más de 2 años	5 000 a 30 000
3	Implementar variadores de velocidad en procesos que	10 a 20 %	Más de 2 años	5 000 a 20 000

²⁶ Minem, 2017, p. 48.

	sean necesarios. Utilizar fajas de alta eficiencia.			
4	Mejorar el factor de potencia mediante banco de condensadores individuales.	10 a 30 %	Más de 2 años	5 000 a 20 000
5	Efectuar el mantenimiento periódico de los motores según las especificaciones del fabricante.	5 a 15 %	Más de 1 año	2 000 a 10 000

Fuente: Fondo Nacional del Ambiente (Fonam)

Tabla 27. Bombas con mejoras energéticas y potenciales ahorros de energía

	Mejora de eficiencia energética	Potencial de ahorro	Periodo de retorno	Inversión USD
1	Evaluar la implementación de controles automáticos de presión y caudal. Implementar variadores de velocidad en el motor de la bomba.	10 a 20 %	Más de 2 años	5 000 a 20 000
2	En bombas de gran capacidad, implementar un sistema de monitoreo para calcular el tiempo óptimo de renovación.	5 a 15 %	Más de 1 año	1 000 a 10 000
3	Control de operación durante horas punta. Evaluar la instalación de controladores de máxima demanda si el proceso lo permite.		Según proyecto	

Fuente: Fonam

4.3.2. Implementación del SGE

Su implementación facilita la gestión energética de una organización o empresa sin importar el área de la actividad en la que se desarrolla. Esta herramienta permite

mejorar el desempeño energético, los costos financieros relacionados a esta y las emisiones de los gases de efecto invernadero.

La implementación del SGE de una organización recurre a un plan energético con lineamientos y metas planificadas para fortificar la gestión de la energía y la política energética de la organización; plan que advierte a los trabajadores, directores y plana gerencial de las medidas tomadas para una ganancia al largo plazo en el consumo de la energía, los ahorros posibles a lograr y las ventajas competitivas para su organización. La puesta en marcha del SGE deberá ser monitorizada, verificada y reportada (MVR) para determinar el nivel de acierto de los objetivos planificados y valorar los resultados.

La implementación del SGE asegura:

- a. Cumplir con las normas de calidad energética
- b. Conocer y comprender la situación energética actual de las áreas del sistema de operación.
- c. Identificar las actividades y las oportunidades de crecimiento vinculadas a la gestión de la energía.
- d. El ahorro económico y energético comprobado.
- e. Asegura el manejo de las medidas de eficiencia energética a través de su monitorización.
- f. Relevancias en la mejora continua de la gestión energética.
- g. Acatamiento de las leyes nacionales e internacionales sobre emisiones de gases de efecto invernadero.

4.3.3. Aporte de las tecnologías innovadoras en la eficiencia energética

Han transcurrido tres generaciones de evolución tecnológica en la industria global mundial. La gran industria minera como fuente de suministro de insumos para las tecnologías emergentes se ve obligada a interactuar junto a estos nuevos retos tecnológicos y a modificar sus esquemas en toda la línea de producción de sus minerales. Esto con el objeto de incorporar la transformación de la digitalización en su industria, en la búsqueda de mayor rentabilidad, mejores procesos, uso de energía más eficiente y el cuidado del medio ambiente.

4.4. Digitalización para una minería 4.0

La innovación tecnológica dentro de la gran minería es ineludible. Los obstáculos que representan la obtención del mineral procesado son cada vez más complejos, lo que repercute en la exploración de futuros yacimientos que se encuentran a mayores profundidades. La intensidad del uso de energía, durante los procedimientos para alcanzar el mineral objetivo, es cada vez mayor por la caída de la ley de los minerales y la dureza de la misma. Por tal razón, la incorporación de tecnologías digitales en la minería es un cauce de la trazabilidad tecnológica del aporte de aumentar la variabilidad y la resiliencia de procesos cada vez más complejos. Estar inmerso en constantes cambios genera incertidumbres comunes en la industria minera que pueden ser manejadas a través de procesos colaborativos que ayuden a crear espacios de solución del camino a seguir.

Las siguientes líneas hacen mención del aporte sectorial que puede brindar la digitalización, en la línea de aprovechar las oportunidades que ofrece esta tecnología.

La conectividad de equipos, maquinarias y personas a través de la fibra óptica permite centralizar y dirigir de un solo lugar, así como beneficiarse de la información histórica disponible y los sucesos en tiempo real. Gracias a ella, se podrán tomar decisiones y desarrollar disposiciones que se basen en datos y que puedan pronosticar tendencias. En tal sentido, la optimización digital de la minería 4.0 identificara desafíos críticos como aspectos digitales, integración de sistema, ciberseguridad y otros.

a. Data Science: la ciencia de datos es una rama de la ciencia que consigue extraer el valor de los datos mediante sistemas, algoritmos y técnicas científicas. Para contribuir en la toma de decisiones, proporciona información e identifica posibles tendencias. Cabe recalcar que la información que puede ser extraída y aplicada es que le otorga su valor.

b. Simulación de escenarios: el consumo energético de los procesos puede reproducirse de forma virtual para investigar y analizar su comportamiento, examinar los efectos de las modificaciones o comparar otras opciones de diseño modelando el empleo de los recursos energéticos mediante el sistema What If. Alcanzar la eficiencia energética es la última meta para minimizar el impacto sobre las fuentes de recursos y disminuir las emisiones de gases o componentes altamente contaminantes.

c. Modelamiento predictivo: se permite diseñar sistemas que puedan calcular el impacto del consumo energético y de las emisiones en la eficiencia energética, a través del análisis de datos históricos y el *data science*

d. Mejoramiento de la trazabilidad en el consumo de energía a lo largo del proceso a través de los siguientes métodos:

- Sensores de consumo en tiempo real: instrumentos con acondicionamiento de señal en una unidad física, analógica o digital que incorporan un procesador, memoria y un controlador de red. Ante una variabilidad de los consumos energéticos, estos son analizados y procesados de manera que el sistema autorregula su consumo, ya que enfoca el trabajo en su punto óptimo.

- Medición de huella de carbono: se efectúa mediante reconocidas normas internacionales como son los protocolos de efecto invernadero (GHG Protocol) y la ISO 14064:2012 sobre GEI. Estas se vinculan con la huella corporativa y la del producto.

- Definición de estándar de trazabilidad: adoptar la norma que soporte aquella tecnología que permita dar trazabilidad al consumo de energía. Con ello, sería posible identificar las fuentes de energía y ver cómo se distribuye el consumo dentro de las operaciones mineras. La calidad de esta información proveerá la confianza de la comunidad de una energía más sustentable.

- Formar una plataforma de ofertantes de energía limpia: elaboración de una plataforma que contribuya a la trazabilidad de la energía; es decir, que ayude a conocer el principio y, en consecuencia, el impacto de la procedencia de la huella de carbono al separar fuentes de energía limpia de los componentes fósiles.

4.5. Implementación de sistemas de conminución

4.5.1. Implementación de un sistema de control en circuito de molienda

En la actualidad, existe una gama de sistemas de control aplicados en los procesos de molienda, tales como sistemas expertos, sistemas basados en un modelo predictivo (MPC), control de lógica difusa, controladores multivariantes, sistemas basados en control PID, controles basados en redes neuronales, programación lineal y procesos estadísticos. Dentro de esta gama los principales métodos de control corresponden a los sistemas expertos y sistemas basados en un modelo predictivo (MPC), cuyas diferencias se indican a continuación:

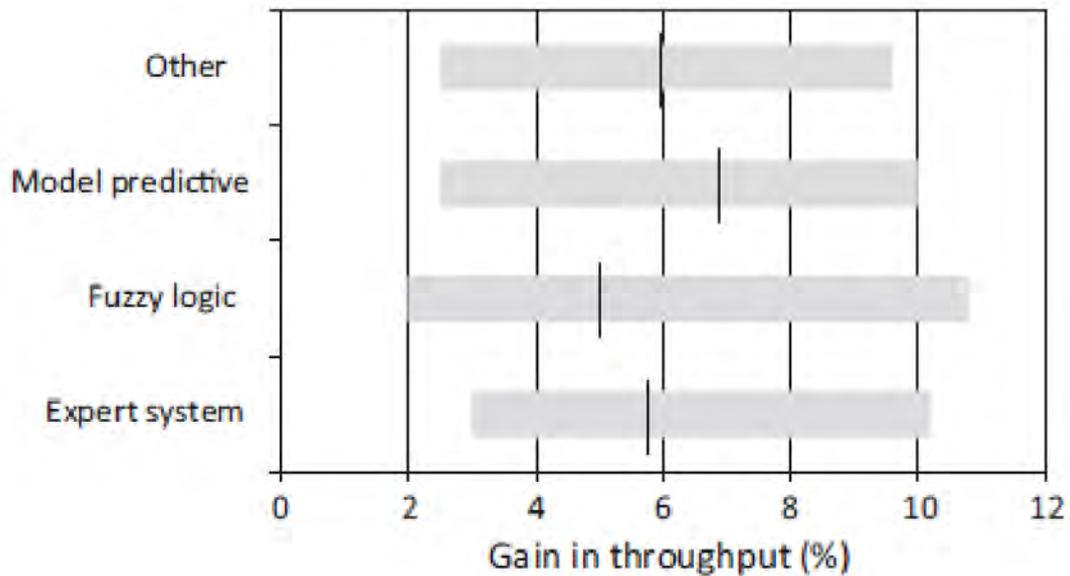
a. Un sistema experto utiliza un modelo de los operadores; en cambio, un modelo MPC utiliza un modelo matemático.

b. Un sistema experto es algebraico y está basado en reglas; en cambio, un modelo MPC se basa en algoritmos y es predictivo.

La implementación de un sistema de control trae muchos beneficios, como el aumento del rendimiento respecto a la producción del mineral, lo cual se puede reflejar

en la siguiente gráfica del 2 % al 11 %. Asimismo, un sistema de control trae una reducción de la variabilidad del rendimiento, de la variabilidad de la carga del molino, del consumo energético y un tamaño de partícula alcanzado.²⁷

Ilustración 12. Rango de aumento de rendimiento alcanzado con diferentes modelos de control para el proceso de molienda



4.5.2. Verificación de eficiencia en subetapas de chancado y de moliendas

Se aconseja comprobar el consumo de energía de las subfases de trituración y molienda en relación con las toneladas de material tratado. Para ello, son necesarios contadores de energía que permitan medir o cuantificar el consumo energético por tonelada de cada unidad. Es necesario detallar la cantidad específica que se encuentra dentro del intervalo que se muestra en la tabla siguiente.

²⁷ GIZ, 2021.

Tabla 28. Consumo de energía por subetapas de chancado y de molienda

Etapa	Subetapa	Rango de tamaño	Consumo de energía KWh/t
Chancado	Primaria	100 a 10 cm	0,3 a 0,4
	Secundaria	10 a 1 cm	0,3 a 2
	Terciaria	1 a 0,5 cm	0,4 a 3
Molienda	Primaria	10 a 1 mm	3 a 6
	Secundaria	1 a 0,5 mm	4 a 10

En el caso de la molienda también existe un *software* de simulación computacional de cálculo detallado, como es el caso del Moly-Cop Tools, diseñado para caracterizar la eficiencia de un determinado circuito de molienda con base en modelos válidos de aplicaciones reales. Con este tipo de herramientas es posible calcular la potencia requerida en la subetapa de molienda para luego poder validar los datos con mediciones reales efectuadas.

En caso de observar consumos de energía que superen los valores de la tabla mencionada, se recomienda revisar las piezas del molino para darle un mantenimiento adecuado, ya que el desgaste de ellos baja el rendimiento del sistema de molienda. Asimismo, también verificar si existe un sobredimensionamiento de los motores, ello contribuye al acrecentamiento en el consumo de energía de este proceso. Además, es relevante que la eficiencia de la subetapa de chancado sea superior a la molienda. Si esto no se diera correspondería hacer el mantenimiento adecuado a los equipos empleados en el proceso de molienda.

4.5.3. Incorporación de Gearless Mill Drive (GMD)

El proceso de molienda de minerales de baja ley acarrea un problema de gigantismo en los equipos contenedores para los procesos que permiten procesar mayores tonelajes de mineral. La tecnología GMD disminuye considerablemente el roce mecánico existente de los sistemas convencionales, como son los ocurridos en la caja de engranaje, piñones y acoplamientos que producen un desgaste de las piezas ocasionando la disminución del rendimiento de las máquinas y, por tanto, la baja de eficiencia en el consumo de energía del proceso.

Los accionamientos GMD controlan la velocidad de las máquinas, con lo que permiten partidas suaves y eliminan el estrés mecánico. El equipo provee de máximo control en el proceso que llega a alcanzar un alto en la eficiencia y flexibilidad. Los motores GMD se componen de un set de transformadores, motores de anillos y una sala eléctrica para su funcionamiento. Los motores de anillos contemplan polos sin engranajes, o también llamados síncronos o envolventes, se instalan directamente en los polos de la carcasa del molino, convierten el cuerpo del molino en el rotor para finalmente el estator envolver al molino; el sofisticado sistema de bobinado de una sola vuelta garantiza que se minimicen las pérdidas del bobinado del estator. El aumento de temperatura del estator es relativamente bajo, con lo que se disminuye la expansión térmica, lo cual produce menores pérdidas y una mayor eficiencia.

Se ha demostrado mediante estudios y pruebas que, en el contexto de la alimentación de molinos del tipo SAG (Semi-Autogenous Grinding) y AG (Autogenous Grinding), el uso de bolas como medio de molienda ofrece una serie de ventajas significativas. En primer lugar, las bolas proporcionan una mayor confiabilidad en el proceso de molienda, ya que su tamaño y forma se han optimizado para garantizar una distribución uniforme del material a moler. Esto reduce la posibilidad de obstrucciones y bloqueos en el molino, asegurando un funcionamiento más estable y continuo.

Los beneficios que presentan la tecnología GMD son los siguientes:

- Reducción del mantenimiento de acoplamiento, cojinetes y cajas de engranaje.
- Mayor productividad de la planta debido a una mayor disponibilidad.
- Hasta un 3 % de eficiencia energética se puede lograr con la tecnología sin engranajes (a velocidad y potencia nominal).
- Mayor potencia disponible en los componentes accionados, lo que supera las pérdidas mecánicas de los sistemas reductores.
- Menores gastos operativos.
- Diseño robusto.

4.5.4. Soluciones de control para molinos SAG

Un programa de control denominado *BrainWave* para molinos SAG se sirve de tecnologías patentadas de control adaptativo y predictivo basado en modelos.

En este caso, observaremos el caso del cliente Antofagasta Minerals.

Objetivo del proceso de control:

- a. Mantener la carga programada en el molino, lo que garantiza una óptima operación del molino.
- b. Asimilar las variaciones automáticamente en la dureza del mineral.

c. Minimizar los retrasos en la producción de la planta ofreciendo una compensación suficiente por los desajustes operativos del molino de guijarros.

d. Establecer una producción adecuada que pueda reducir las variaciones en la velocidad del molino.

e. Extender el índice de producción y proporcionar un rango de trituración consistente.

Una de las mayores minas a cielo abierto de Chile, la mina Los Pelambres, propiedad de Antofagasta Minerals, está representada en el sistema de control, Bailey. Cada año genera unas 320.000 toneladas de concentrado de cobre. El sistema de control *BrainWave*²⁸ ayuda a mejorar el rendimiento global y proporciona un control preciso de la carga en el molino SAG, sustituyendo al anterior sistema de control empleado para ayudar a estabilizar el proceso e incrementar la producción en la planta minera de Los Pelambre.

4.6. Proyectos mineros implementados

4.6.1. Antofagasta Minerals S.A (AMSA)²⁹

Es uno de los mayores productores de cobre de la región, el tercero en Chile y el noveno del mundo. El grupo posee y gestiona Los Pelambres (MPL), Centinela (CEN), Antucoya (ANT) y Zaldívar (CMZ), cuatro explotaciones mineras a cielo abierto en Chile. 827 953 toneladas de cobre fino, 11 561 toneladas de concentrado de molibdeno, 282 253 onzas de oro y 3 818 698 onzas de plata produjeron estas cuatro firmas en 2019.

Tabla 29. Áreas de mayor consumo energético de la empresa con referencia a la electricidad

KPI Gestión Energética AMSA				
AMSA	Iniciativas EO	Reducción de emisiones GEI tCO ₂ eq/año	Ahorro de electricidad MWh/año	Ahorro de Diesel L/año
MLP	Rendimiento SAG	25 559	62 478	-
CEN	Reducción consumo específico SAG	9 224	23 002	-

²⁸ BrainWave, 2015.

²⁹ Antofagasta Minerals, 2019.

	Utilización chancador 1°, 2° y 3°	1 088	2 774	-
ANT	Reducción de insumos de consumo CAEX	6 461	-	2 161
CMZ	-	-	-	-

Tabla 30. *Minera Los Pelambres, iniciativas implementadas desde el año 2017*

Iniciativa	Descripción
Rendimiento SAG	Aumento del rendimiento del SAG a través de la optimización del F80, gestión de <i>pebbles</i> y estrategia <i>Net Metal Production</i> (NMP).

Nota: En los últimos años, se ha comercializado una tecnología, conocida como Cyclone™ PST, que tiene la capacidad de entregar información sobre el tamaño de partículas en el *overflow* de cada hidrociclón individual de la batería en tiempo real. Esto permite alimentar de información en tiempo real al DCS de la operación para poder conocer su propio proceso en más profundidad y así tomar acciones correctivas, preventivas e, idealmente, implementar una estrategia de control de molienda automática en la operación. Así, se permite que la operación alcance sus objetivos de producción neta (*Net Metal Production*, NMP por sus siglas en inglés).

Tabla 31. *Minera Centinela, iniciativas implementadas desde el 2018*

Iniciativa	Descripción
Consumo específico SAG	Reducción de la energía específica en el SAG debido a la iniciativa <i>Mine to Mill</i> .

Nota: *Mine to Mill* es una optimización de todo el proceso minero desde la planificación de la voladura, la geología, la geotecnia; pasando por la carga y el transporte, hasta llegar al «molino».

Tabla 32. *Minera Antucoya, iniciativas implementadas desde el año 2018*

Iniciativa	Descripción
------------	-------------

Utilización chancador 1°, 2° y 3°	Taller de análisis de las causas para las bajas en rendimiento, toma de decisión y monitoreo de impacto. Evaluar factibilidad técnica de disminución de tamaño de alimentación de mineral mediante el aumento del factor de carga en tronadura, la instalación de pica roca y parrillas en tolva de chancado primario. Aumento de utilización del chancador primario mediante mejores prácticas de aseo operacional y mantenimiento. Evaluar rediseño de las barras de los harneros y del chute de salida del primario, estudiar la factibilidad de un <i>switch</i> de bloqueo operacional local e integrar la gestión de operación entre mina y área seca.
-----------------------------------	--

Fuente: Reporte del avance de convenio de cooperación entre Ministerio de Energía y Consejo Minero.

4.6.2. Sociedad Contractual Minera El Abra (SCMEA)³⁰

Freeport-McMoRan, que posee el 51% de la propiedad, es poseedora de esta propiedad. Codelco es dueña del 49% restante. Las operaciones se sitúan en la provincia chilena de El Loa, II Región, a unos 90 kilómetros al noreste de Calama. La planta de procesamiento de mineral, situada a 15 km al sureste de la mina, se ubica a una altitud aproximada de 3.300 metros sobre el nivel del mar, mientras que el tajo está situado a unos 4.100 metros sobre el nivel del mar.

En el presente, la Minera El Abra utiliza la minería a cielo abierto. La trituración, la biolixiviación, la extracción con disolventes y la electro obtención para fabricar cátodos de cobre de gran pureza a partir de sulfuros de cobre. Estos productos se transportan por ferrocarril desde la mina hasta el puerto de Antofagasta y se distribuyen por todo el mundo.

Tabla 33. Iniciativa de gestión energética SCMEA

KPI Gestión Energética SCMEA				
SCMEA	Iniciativas EO	Reducción de emisiones GEI tCO ₂ eq/año	Ahorro de electricidad MWh/año	Ahorro de Diesel L/año

³⁰ Sociedad Contractual Minera El Abra, 2018.

Mejora del FDP	356	887	-
Cambio de luminarias de AP (LED)	1,88	4,7	-

FE = 0,401 tCO₂eq/MWh

Tabla 34. *Minera El Abra, iniciativas implementadas*

Iniciativa	Descripción
Mejoramiento del factor de potencia	<p>A fines del año 2015 se identificó que el factor de potencia de la planta estaba en promedio cercano a 0,96.</p> <p>Se identifica que la planta de chancado es el mayor contribuyente en el bajo valor del factor de potencia, por lo que se decide instalar un banco de condensadores de 7,5 MVAR en esta área.</p> <p>El ahorro de energía por disminución de pérdidas eléctricas tras la instalación del banco es de 0,22 MWh, lo cual llevado a las horas de operación anual bajo las condiciones actuales (<i>turn ON/OFF</i>) equivale a 0,22 MW*4032 horas/año = 887.040MWh/año.</p>
Cambio de luminarias de alumbrado público AP (LED)	<p>Se selecciona luminaria LED, lo que mejora la eficiencia energética (EE) y se da cumplimiento normativo al DS 43.</p> <p>El año 2018 se realizó el 25 % del reemplazo de AP de la Gerencia de Suministros y Servicios, lo que mejoró la Eficiencia Energética (EE) y cumplimiento al DS 43. El 2019 se subió a un 86 % y para este año se ha extendido esta iniciativa a luminarias del tipo industrial y ornamental de exterior de edificios.</p> <p>Todo lo cual llevó a un ahorro energético de 4,7 MWh/año.</p>

Fuente: Reporte del avance de convenio de cooperación entre Ministerio de Energía y Consejo Minero

4.7. Implementación de nuevas tecnologías en la minería peruana

La variación de los mercados mineros, seguridad, regulaciones ambientales, huella de carbono, competitividad y políticas de estado son requisitos contemplados en las carteras de innovación tecnológica para que la minería local no quede desfasada de los adelantos globales en automatización, digitalización y procesamiento de datos en tiempo real de los procesos de la minería.

La implementación en las empresas mineras de estas nuevas tecnologías es inminente, su implementación a futuro ofrece mayor eficiencia y rendimiento en sus procesos; además de la actualización, capacitación de nuevas competencias de tecnologías renovadas en el personal de la minería.

Nuestro país se viene dando pasos importantes en la implementación y ejecución de tecnología digital, sobre todo la automatización de tecnologías de punta en las plantas de proceso. Entre las cuales nombraremos a las siguientes:

4.7.1. Proyecto cuprífero Quellaveco

Este yacimiento ubicado en la región de Moquegua es uno de los más significativos del país. La corporación Anglo American, propietaria de esta concesión, prepara a Quellaveco para ser la pionera mundial en operaciones totalmente digitales de los procesos mineros de sus plantas, lo que tiene como objetivos la sostenibilidad e innovación, la preservación ecológica y el uso de tecnologías de avanzada.

El centro integrado de Quellaveco será el cerebro que recoja toda la información que genere la mina. Esta herramienta digital propone el uso de datos inteligentes en las predicciones para tomar mejores decisiones, avanzar en el uso de inteligencia artificial y así poder simular escenarios en tiempo real para optimizar los procesos y el uso adecuado de los recursos. Asimismo, contará con una flota de 27 camiones autónomos mineros y promoverá la edificación de una central de energía renovable no convencional, la central eólica Punta Lomitas, cuya capacidad nominal es de 260 MW en la región Ica, la cual suministrará a la minera para sus operaciones de 187 MW. Dicho parque eólico será construido por la empresa ENGIE.

4.7.2. Mina Tambomayo

Importante unidad minera en la explotación subterránea de oro (Au) y plata (Ag), que tiene actualmente una capacidad operativa de 1 500 toneladas métricas diarias. Está ubicada en la región Arequipa y tiene como propietarios a la Cía. Buenaventura.

En la actualidad, mantiene una operación sostenible a través de eficiente gestión y calidad de energía, asimismo, implementación digital en gestión de energía y automatización a través de su solución EcoStruxure (de Schneider Electric). Se ejecutó una solución integral a través del suministro eléctrico de nueve *e-houses*.

Implementación y equipamiento 100 % *type test* bajo la Norma ANSI/NEMA e IEC, y el sistema *hybrid* DCS que permite monitorear y controlar el proceso de la planta. El molino SAG, que es el corazón de la operación, es accionado por un variador de MT ALTIVAR 1260, innovación que contribuye a la solución de la eficiencia del proceso; además, ha permitido que opere las 24 horas del día con un nivel muy alto de confiabilidad, ahorro de energía, competitividad y menor emisión indirecta de GEI.

4.7.3. Mina Antamina

Esta empresa se encuentra dentro de las diez compañías más influyentes a nivel internacional. Su complejo minero es de carácter polimetálico, posee concentrados de cobre (Cu), molibdeno (Mb), zinc (Zn), plata (Ag) y plomo (Pb) ubicado en la Ancash. Esto la convierte en uno de los yacimientos con mayor tasa producción de concentrados de cobre y zinc.

La compañía está controlada por la multinacional BHP Billiton Ltd. y Anglo Swiss Glencore plc, corporación que lidera una operación de clase mundial y que viene incorporando tecnologías de última generación que no solo impulsan la productividad, sino que la hacen una operación sostenible. Como parte de la innovación, la compañía incorporó en sus procesos de producción tecnologías como *machine learning* para que su planta concentradora tenga niveles más elevados de cobre.

En el sector minero, la analítica avanzada de datos se está imponiendo como método de vanguardia para la automatización y optimización de procesos. El instrumento tecnológico *machine learning* analiza datos; reconoce patrones, tendencias y correlaciones durante la evaluación de la información operativa para generar toma de decisiones adecuadas en tiempo real. Dicha tecnología consiste en modelamientos algorítmicos que aprenden del récord histórico de la planta para tomar decisiones predictivas y acertadas en sus procesos.

Antamina emplea esta técnica en sus operaciones de concentrados desde mediados de 2021. Diversos tipos de factores, entre ellos la molienda SAG, la molienda secundaria y la categorización y tratamiento de *pebbles* se han conjugado para hacer posible esta implementación, a fin de optimizar el procedimiento de molienda bajo una gran variedad de minerales.

4.8. Impacto económico y ambiental de mejorar la eficiencia energética en la minería del cobre en el Perú

En cuanto al impacto económico, la mejoría de la eficiencia energética de la minería del cobre podría tener varios efectos positivos. En primer lugar, se podría reducir el costo de producción de las compañías mineras, lo que las haría más competitivas en el mercado global del cobre. Además, se podría esperar un aumento en la productividad de las operaciones mineras, lo que podría impulsar el crecimiento económico del país. Por último, la implementación de tecnologías más eficientes podría requerir la contratación de personal especializado en energía y tecnología, lo que podría generar empleo en el sector.

Respecto del impacto ambiental, el cambio positivo de la eficiencia energética también podría tener importantes efectos positivos. En primer lugar, se podrían reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero vinculadas a los yacimientos mineros que producen cobre. Esto último podría ayudar a contrarrestar los impactos negativos del cambio climático. Además, la implementación de tecnologías más eficientes podría reducir la huella de carbono de la minería del cobre, lo que podría mejorar la reputación ambiental del sector y su capacidad para acceder a mercados que exigen prácticas ambientales más sostenibles.

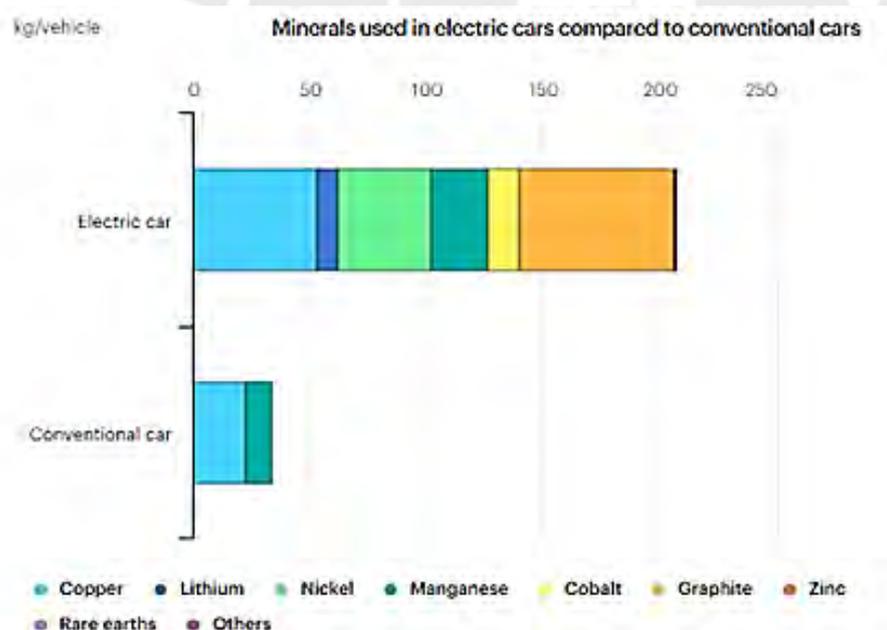
De esta manera, se considera que el progreso de la eficiencia energética en la minería del cobre del Perú es una oportunidad significativa para generar beneficios tanto económicos como ambientales. Es crucial que las empresas mineras trabajen junto con el gobierno y otros actores relevantes para implementar tecnologías más eficientes y sostenibles en sus operaciones. De esta manera, se podrán aprovechar las oportunidades de crecimiento económico y al mismo tiempo se podrá minimizar los impactos ambientales.

Capítulo 5

Minerales críticos en la transición de tecnologías de energías limpias

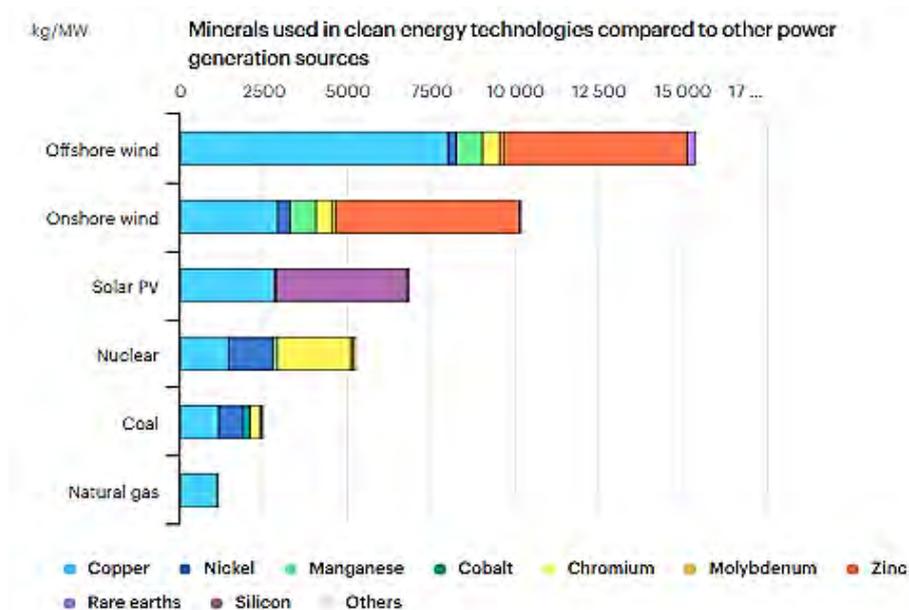
La característica distintiva y primordial de estos minerales es el riesgo de interrupción en su cadena de suministro, lo cual puede tener un impacto significativo en la economía en comparación con otros minerales cuya demanda está garantizada. Los sistemas energéticos actuales, impulsados por cambios en los paradigmas de sostenibilidad y cuidado del medio ambiente, requieren una cantidad mayor de minerales críticos en comparación con las tecnologías clásicas basadas en combustibles fósiles. Por ejemplo, las plantas eólicas y los parques fotovoltaicos necesitan una mayor cantidad de minerales críticos en sus componentes en comparación con las plantas de generación térmica. Los vehículos eléctricos (VE) requieren seis veces la cantidad de cobre que un vehículo convencional.³¹

Ilustración 13. *Minerales críticos usados en tecnologías de energía limpia*



³¹ IEA, 2021

Ilustración 14. *Minerales utilizados en tecnologías de energía limpia en comparación de otras fuentes de generación de energía*



La seguridad en la transición hacia una energía limpia se basa en la sostenibilidad de los minerales críticos. La demanda de estos minerales, como el litio (Li), níquel (Ni), cobalto (Co), magnesio (Mg) y grafito, está estrechamente relacionada con su aplicación tecnológica. En particular, se espera que la demanda de estos minerales sea mucho mayor en el ámbito de las baterías de almacenamiento de energía, gracias a lo cual será posible obtener baterías con mayor autonomía y duración. Por otro lado, el cobre juega un papel fundamental en la aplicación de las tecnologías vinculadas con la electricidad.

A partir de la mitad de la década del 2010, y con el escenario del Acuerdo de París (estabilización del clima, temperatura global muy debajo a 2 °C), la demanda de minerales críticos por efectos de la transición energética global es trascendental. Al hacer una proyección, en dos décadas, la demanda del cobre y tierras raras aumentaría en un 40 %, el níquel y cobalto en un 60 % o 70 %, y casi un 90 % para el litio.

Los mecanismos internacionales en la seguridad energética actual están diseñados para que los hidrocarburos —y sobre todo el petróleo—, la volatilidad de la escasez y el aumento de precios no desestabilicen el mercado de consumo. De la misma forma, el suministro de seguridad de los minerales críticos tendría que ser garantizado con la formulación de políticas energéticas que amplíen el horizonte a posibles nuevas vulnerabilidades. La preocupación de estos no desaparece de la volatilidad de precios y del suministro de las energías renovables; por eso la trascendencia de mantener la

vanguardia en la seguridad energética mundial con cambios muy rápidos en la transición a las energías limpias.

Sin embargo, vemos en la actualidad que las políticas energéticas están diseñadas para duplicar los requisitos de los minerales críticos hacia el 2040 (escenario - STEPS) y así garantizar la transición energética. No obstante, para el cumplimiento de los objetivos de los compromisos del Acuerdo de París (escenario - SDS) y, mediante opiniones del consenso relacionadas con el tema, se necesitaría cuadruplicar los requisitos generales de los minerales para una transición a las energías limpias hacia el año 2040. Es decir, para llegar a emisión cero al 2050 se necesitará seis veces más la cantidad de minerales el 2040 que en la actualidad.

El rápido despliegue en la transición energética a energías limpias implica un aumento del consumo de los minerales. ¿Cuáles son los sectores que demandan estos insumos? La fabricación de vehículos eléctricos y los acumuladores de energía. La producción de estos al 2040 (SDS) será 30 veces mayor y, por ende, los minerales que tendrán mayor demanda serán el litio (Li), níquel (Ni), cobalto (Co), magnesio (Mg) y grafito. El litio tendrá una demanda aumentada más de 40 veces y el resto de los insumos, alrededor de 20 a 25 veces. Hacia el año 2040, la extensión de las redes de electricidad ocasionará una duplicación del consumo del cobre en sus líneas.

Por el incremento de la generación de las plantas eléctricas bajas en carbono, la demanda de insumos en minerales de este sector será el triple hacia el año 2040. Por una parte, podemos nombrar las plantas eólicas marinas que demandan un uso intensivo de minerales críticos y, por otra parte, están los parques solares fotovoltaicos. Otro sector que podemos nombrar es el del hidrógeno, que se está desarrollando como un vector energético muy importante en la transición de combustibles bajos en carbono, cuya demanda del Ni para los electrodos de los electrolizadores sería muy convincente.

La trayectoria de la demanda está sujeta a grandes incertidumbres políticas y tecnológicas. La mayor fuente de la demanda procede de la rigurosidad sobre la incertidumbre de las políticas climáticas. Si estas políticas están orientadas al cumplimiento estricto de los compromisos sobre el cambio climático del Acuerdo de París, por tanto, la fuerza de la transición energética para la reducción de las emisiones, será la acción y el cumplimiento de las políticas. Esto será vital para reducir los riesgos de la inversión de capitales en los nuevos proyectos. El rápido aumento en la demanda de minerales críticos está generando un desequilibrio entre la oferta y la demanda. Esta situación puede resultar en escasez de ciertos minerales, lo que a su vez impulsa la necesidad de buscar alternativas o sustitutos para satisfacer los mercados. Sin embargo, estos insumos de reemplazo a menudo no logran satisfacer plenamente las necesidades del mercado, lo que provoca una volatilidad en los precios de estos

minerales, con tendencia al alza. Por ello, episodios como estos podrían ralentizar la transición a energías limpias por el aumento en los costos de los minerales críticos. Por otro lado, en las baterías de iones de litio, los costos de producción disminuyeron en un 90 % debido al aprendizaje tecnológico; sin embargo, los insumos de estos aumentaron y con ello los costos de producción de las baterías serían alrededor de 50 % a 70 % frente al 40 % o 50 % de hace cinco años. Por lo tanto, el aumento en los precios de los minerales tendrá un rol preponderante en los precios finales. Con respecto a las redes eléctricas, el costo del cobre representa el 20 % de la inversión de las redes. Es obvio que la subida en los precios y la escasez del cobre serían un impedimento en el nivel de inversión de las redes.

Mirando hacia el futuro y considerando el impacto del cambio climático, se debe recalcar que los suministros provenientes de minas existentes y los proyectos futuros podrían desempeñar un papel crucial en el abastecimiento de minerales. Según estimaciones optimistas, se espera que los minerales como el litio y el cobalto cubran aproximadamente el 50 % de la demanda, mientras que el cobre podría cubrir hasta el 80 % para el año 2030.

Esto significa que, si se llevan a cabo las operaciones mineras planificadas y se desarrollan nuevos proyectos, existe la posibilidad de satisfacer una fracción significativa de la demanda de estos minerales clave. El litio y el cobalto son especialmente importantes en la industria de las baterías, ya que son utilizados en vehículos eléctricos y almacenamiento de energía, mientras que el cobre es un metal esencial en la infraestructura eléctrica y la construcción.

Existe una infinidad de proyectos ejecutándose alrededor del mundo; sin embargo, hay una estrechez en los suministros de minerales críticos.

a. Alta concentración geográfica de la producción, como el suministro de los minerales platino (Pt), cobalto (Co) y tierras raras (REE), que están ubicados en tres zonas geográficas. Sudáfrica y La República Democrática del Congo son responsables del 70 % de la producción del platino y del cobalto; asimismo, la República Popular China fue del 60 % de tierras raras el año 2019. El panorama de la producción del cobre y níquel es más diverso, pero no por eso existe una estrechez localizada y temporal.

b. Largos plazos de desarrollo de proyectos sugieren un promedio de 16,5 años desde el inicio hasta la primera producción del proyecto minero. Estos largos plazos plantean dudas en satisfacer la demanda si la transición se acelera.

c. Deterioro de la calidad de los recursos. En los últimos años, la calidad de los recursos básicos ha ido cayendo, con lo que se ha ido deteriorando la ley de estos minerales, tal es el ejemplo de la minería en Chile, en la que la ley del cobre cayó

alrededor del 30 %. Por consiguiente, habrá mayor consumo de energía empleada, aumento en los costos de producción, mayor emisión de gases y desechos que tratar.

d. Recuento creciente del desempeño social y ambiental. La explotación y el procesamiento de los minerales pueden generar problemas sociales, así como ambientales, si la producción de esta se maneja de manera deficiente de manera que daña a las comunidades locales e interrumpe el suministro. Por ello, la explotación de estos recursos minerales tendrá que hacerse en forma responsable y sustentable.

e. Elevada disposición al cambio climático. Algunos minerales como el cobre y el litio requieren para sus procesos altos volúmenes de agua. Muchos de los yacimientos se encuentran en zonas de estrechez hídrica.

A medida que la transición energética se acelera, el suministro de los minerales cobra protagonismo en la discusión de la seguridad energética. Por el lado de la oferta, esta debe ir acompañada de un esfuerzo que abarque la demanda de sus tecnologías, la resiliencia de la cadena del suministro y la sostenibilidad; en las transiciones energéticas rápidas y ordenadas se demandan inversiones en los suministros de los minerales para mantener el rápido crecimiento de la demanda. Por otra parte, los formuladores de políticas requieren adoptar reglas claras y seguras para alentar las inversiones en los nuevos proyectos de suministro. La falta de confiabilidad de las empresas en las políticas ambientales ocasionaría que la decisión de invertir se haga en base a expectativas mucho más conservadoras.

El descenso de la intensidad del material y la promoción de la sustitución mediante la innovación tecnológica puede jugar un papel importante en el alivio de las tensiones del suministro y la disminución de los costos de fabricación. Por ejemplo, tuvo un rol relevante en la fabricación de celdas fotovoltaicas, con la reducción del 40 % al 50 % en el empleo de la plata y el silicio en la última década, lo que hizo que los costos bajaran y permitió un aumento espectacular para las energías fotovoltaicas. La innovación tecnológica es capaz de facilitar nuevos suministros de gran relevancia, la fuente de suministros nuevos y más diversificados será muy importante para allanar el camino hacia una energía limpia.

Un fortalecido enfoque en el reciclaje, la resiliencia en la cadena del suministro y la visión sostenible son fundamentales. El papel del reciclaje será importante para disminuir la presión en los suministros primarios. Los flujos de desechos de las tecnologías limpias pueden cambiar la imagen de incertidumbre del uso final (baterías y turbinas eólicas). Se estima que la suma reciclada de cobre, litio, níquel y cobalto de las baterías usadas combinadas generarían un descenso del 10 % los suministros básicos.

Se requieren acciones claras para garantizar la seguridad del suministro de minerales críticos, como las siguientes:

- a. Asegurar la nueva inversión diversificando las fuentes de energía.
- b. Promover la innovación de la tecnología en toda la cadena de valor.
- c. Fomentar una cultura del reciclado de los elementos que ha finalizado su vida útil, y proteger los procesos de recolección y clasificación.
- d. Mejorar la resiliencia de la cadena de suministro de diferentes minerales y las respuestas de capacidad rápida a las interrupciones del suministro.
- e. Incluir mayores criterios y estándares sociales y de gobernanza puede lograr elevar los volúmenes generados desde una visión sostenible y responsable a un costo reducido.
- f. Fortalecer y garantizar una cultura de ayuda internacional entre productores y consumidores.

5.1. Tecnologías de energía limpia requieren variedad de minerales y metales

Las tecnologías de energías limpias, desde las turbinas eólicas, paneles fotovoltaicos, autos eléctricos y baterías, requieren de una gama de minerales cuyo volumen de requerimiento está dados por la variedad de la tecnología de energía limpia.³²

Tabla 35. Necesidad crítica de minerales para tecnologías de energías limpias

	Cu	Co	Ni	Li	REE	Cr	Zn	PGM	Al
PV	A	B	B	B	B	B	B	B	A
Eólica	A	B	M	B	A	M	A	B	M
Redes eléctricas	A	B	B	B	B	B	B	B	A
Hidro	M	B	B	B	B	M	M	B	M
EV y baterías	A	A	A	A	A	B	B	B	A
Hidrógeno	B	B	A	B	M	B	B	A	M

Nota: Importancia relativa de los minerales para una tecnología limpia.

A: alto

M: moderado

B: bajo

³² IEA, 2021.

Existe una gran importancia de suministrar minerales y metales críticos para la demanda de tecnologías limpias las próximas décadas. La IEA realizó un estudio en el que evalúa la demanda de minerales de una amplia gama de tecnologías de energías limpias bajo dos escenarios: políticas declaradas (STEPS) y desarrollo sostenible (SDS). Las tecnologías de energías limpias que se consideran son las siguientes:

- Solar fotovoltaica, eólica y nuclear.
- Redes eléctricas.
- Vehículos eléctricos y almacenamiento de baterías.
- Hidrógeno (electrolizadores y pilas de combustible).

La demanda proyectada de minerales va a depender de la rigurosidad de las políticas ambientales y de las posibles vías de desarrollo tecnológico. Para el 2040, las demandas globales de minerales para las energías limpias experimentarán un aumento significativo en dos escenarios: STEPS y SDS. Bajo el escenario STEPS, se espera que estas demandas se dupliquen, mientras que bajo SDS se cuadripliquen.

En ambos escenarios, los vehículos eléctricos y las baterías jugarán un papel crucial en el crecimiento de la demanda de energías limpias durante las próximas dos décadas. Estos dos sectores representarán la mitad del crecimiento total, impulsados principalmente por la creciente necesidad de materiales para las baterías.

Tabla 36. *Demanda de minerales según escenarios STEP y SDS*

	Demanda de minerales al 2040	
	STEPS	SDS
EV y baterías	10 veces la demanda actual	30 veces la demanda actual

En términos de minerales predominantes, se espera que el grafeno, el cobre y el níquel sean los más demandados. Sin embargo, es importante destacar que el litio experimentará un crecimiento aún más rápido y alcanzará una tasa cercana a 40 veces la demanda actual según el escenario SDS.

Las redes eléctricas ejercen un rol definitorio en la demanda de minerales, ya que aproximadamente el 70 % de la electricidad consumida se utiliza en la producción de concentrados de cobre. Por lo tanto, existe un interés en que estas redes se abastezcan en su mayoría de energías limpias. En el escenario STEPS, se proyecta una expansión significativa de las redes eléctricas para la industria minera. Se espera que las nuevas líneas de transmisión y distribución sean un 80 % mayores en la próxima década en comparación con los últimos diez años. En el escenario SDS, esta expansión

debe duplicarse hacia el año 2040. En términos de generación de energías renovables, alrededor del 50 % de las líneas de transmisión y el 35 % de las de distribución se atribuirán a estas fuentes limpias. En cuanto a los minerales utilizados en las líneas eléctricas, el cobre y el aluminio serán los más empleados.

Durante la última década, la capacidad mundial de energía eólica experimentó un crecimiento impresionante, casi una cuadruplicación. Se espera que, en los siguientes veinte años, esta forma de energía continúe expandiéndose de manera significativa gracias a la madurez de su tecnología y a la combinación de la energía eólica marina y terrestre con financiamiento de bajo costo.

En el escenario SDS, se prevé un incremento considerable en la demanda de tierras raras (como el neodimio y el praseodimio) para los aerogeneradores. Se estima que esta demanda se triplicará para el año 2040. Es interesante destacar que, aunque la energía eólica marina representa solo el 20 % de la capacidad eólica total, casi el 40 % del cobre utilizado en la energía eólica proviene de esta fuente.

Por otro lado, la capacidad mundial de energía fotovoltaica manifestó una evolución aún más impresionante, con un acrecentamiento en 20 veces durante la última década. Tanto en los escenarios STEPS como en SDS, la energía fotovoltaica establecería nuevos récords de implementación a partir del año 2022 y se estima que representará el 45 % de la capacidad que se debe implementar hacia el año 2040. En el escenario SDS, se espera que las adiciones en la capacidad de energía solar fotovoltaica se tripliquen para el año 2040, lo que equivaldría a triplicar la demanda de cobre. Si bien el silicio ha sido el mineral predominante en las células fotovoltaicas, se prevé que en los próximos años se produzca un avance en el uso de nuevos minerales alternativos. Estos minerales incluyen el telurio de cadmio con alto contenido de cadmio, la perovskita con alto contenido de metales preciosos y el arseniuro de galio con alto contenido de arsénico.

La energía nuclear representa cerca del 10 % de la generación mundial de electricidad en 2020. En cuanto a la capacidad instalada, se espera un crecimiento modesto para la energía nuclear hacia 2040, con un aumento del 15 % en el escenario STEPS y del 45 % en el escenario SDS frente al año 2020. En el escenario SDS, la demanda de minerales para la energía nuclear, como el cromo (Cr), el cobre (Cu) y el níquel (Ni), aumentará aproximadamente un 35 % en comparación con el año 2020.

Según el SDS, en términos de entrada de electricidad, la capacidad del electrolizador necesitará alrededor de 1400 GW al 2050. Para tener una mejor referencia, en la actualidad, la capacidad mundial en la fabricación de los electrolizadores es menor a 5 GW. Representaría un gran avance en el uso de la energía eléctrica, por lo que el incremento del suministro de minerales de las plantas

generadoras de energía limpia será muy significativo. El rápido crecimiento del uso del hidrógeno en el SDS sustenta el incremento de la demanda de minerales como el níquel y el cromo para el uso de los electrolizadores. En la actualidad, los electrolizadores alcalinos son los más utilizados, pero los diseños vigentes de estos requieren níquel en cantidades mayores a 1 TN/MW.

5.2. El papel de los minerales críticos que aporta la minería peruana a las tecnologías de energía limpia

El Perú se encuentra comprometido con el Acuerdo de París sobre el calentamiento global. La sociedad peruana tiene como objetivo minimizar el impacto de las emisiones de gases de efecto invernadero y cumplir con las Contribuciones Nacionalmente Determinadas.

En un estudio publicado por la IEA (Agencia Internacional de Energía), se mencionan varios metales críticos necesarios para la transición hacia las energías limpias. Estos metales incluyen el cobre (Cu), cobalto (Co), níquel (Ni), litio (Li), tierras raras (REE), zinc (Zn), metales del grupo de platino (PGM) y aluminio (Al). Todos estos minerales desempeñan un papel crucial en el suministro mundial de recursos esenciales para lograr una transición segura hacia fuentes de energía más ecoamigables.

Por otro lado, el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (Ingemmet), en su Conferencia Panorama de los Metales Críticos en la Transición Energética del Perú 2022, destacó que, de los 17 minerales críticos a nivel global, nuestro país produce 8 de ellos. Estos son el cobre (Cu), el zinc (Zn), la plata (Ag), el plomo (Pb), el hierro (Fe), el molibdeno (Mb), el indio (In) y el grafito; por lo que la cadena de minerales nombrados será, en el mercado global, el aporte para una transición hacia energías limpias.

5.2.1. Producción minera del cobre (Cu), zinc (Zn), plata (Ag), plomo (Pb), fierro (Fe) y molibdeno (Mb).

En el 2019, se alcanzó el más elevado registro histórico en la producción de cobre, con 2,46 millones de TMF, que viene a ser el 12,1 % de la producción mundial, y zinc de 1,40 millones de TMF, que sería el 11,0 % (el Perú se mantiene como el segundo productor de cobre y zinc en el mundo). Siendo Arequipa la región con mayor tasa de producción de cobre (Sociedad Minera Cerro Verde, Minera Las Bambas y Compañía Minera Antamina) y zinc (Compañía Minera Antamina, Nexa Resource Perú y Volcán Compañía Minera en las provincias de Ancash, Ica y Junín respectivamente).

Tabla 37. Producción de minerales concentrados 2020

Producto	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Cobre mill. TMF	1,24	1,30	1,38	1,38	1,70	2,35	2,45	2,44	2,46	2,15
Zinc mill. TMF	1,26	1,28	1,35	1,32	1,42	1,34	1,47	1,47	1,40	1,3
Ag Kg mill. Finos	3,42	3,48	3,67	3,77	4,10	4,38	4,42	4,16	3,86	2,73
Pb mill. TMF	0,23	0,25	0,27	0,28	0,32	0,31	0,31	0,29	0,31	0,24
Fe mill. TMF	7,01	6,68	6,68	7,19	7,32	7,66	8,81	9,53	10,12	8,89
Mb mill. TMF	0,019	0,017	0,018	0,017	0,020	0,026	0,028	0,028	0,030	0,032

Fuente: Minem, 2021.

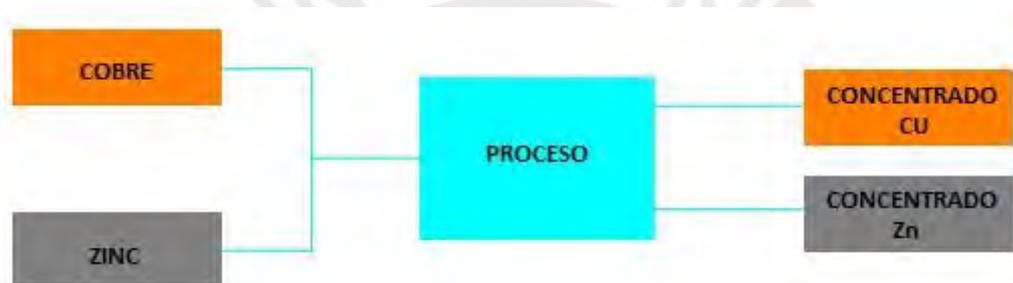
De los datos mostrados se puede concluir de la importancia que tienen las mineras locales en la producción del concentrado de cobre (Cu), zinc (Zn), plata (Ag), plomo (Pb), hierro (Fe) y molibdeno (Mb) y en el aporte del mercado mundial como proveedoras de minerales críticos, lo que es cada vez más intensivo en la industria de energías limpias.

Para el 2040, se predice un incremento significativo en la demanda de cobre debido al crecimiento de la industria de la electromovilidad, que aumentará aproximadamente 30 veces la producción actual. Además, la generación de energía a partir de fuentes solares fotovoltaicas (PV) y eólicas se triplicará y, en las redes eléctricas, el consumo de cobre se duplicará. Es sabido que la proyección de la demanda de cobre, debido a las características de estas tecnologías limpias, es muy intensiva. Por lo tanto, es crucial realizar un seguimiento cercano de estos proyectos para garantizar la sostenibilidad y seguridad futura en la producción de minerales críticos como el cobre, zinc, plata, plomo, hierro y molibdeno.

5.3. Cadena de eficiencia del ciclo de producción del mineral concentrado

En los escenarios STEPS y SDS se prevé una gran variación en la utilización de materiales para satisfacer la demanda de cobre en tecnologías de energía limpia, como la electromovilidad, las fuentes de energía renovable, y la energía solar fotovoltaica y eólica. Estos cambios implican una serie de requisitos, tanto en el suministro del mineral como en la tecnología utilizada en durante todo el procedimiento hasta la generación del producto final; es decir, la obtención del mineral concentrado (cabe destacar que más del 80 % de las exportaciones minera de cobre de Perú corresponden a mineral concentrado).

Ilustración 15. Flujo de la producción de concentrado de cobre y zinc



Al pasar los años, en la explotación de minerales como el cobre (Cu), la ley del mineral disminuye, lo que implica un aumento en el procesamiento del mineral y, por lo tanto, una mayor suma de energía requerida, al igual que una mayor generación de residuos mineros. En el ciclo de procesamiento, donde se transforma el mineral diversificado en mineral concentrado, es crucial gestionar el mineral con tecnologías innovadoras y eficientes. La seguridad y sostenibilidad de los minerales críticos representan un camino lleno de desafíos, lo cual requiere de decisiones estrictas para satisfacer la demanda de tecnologías limpias.

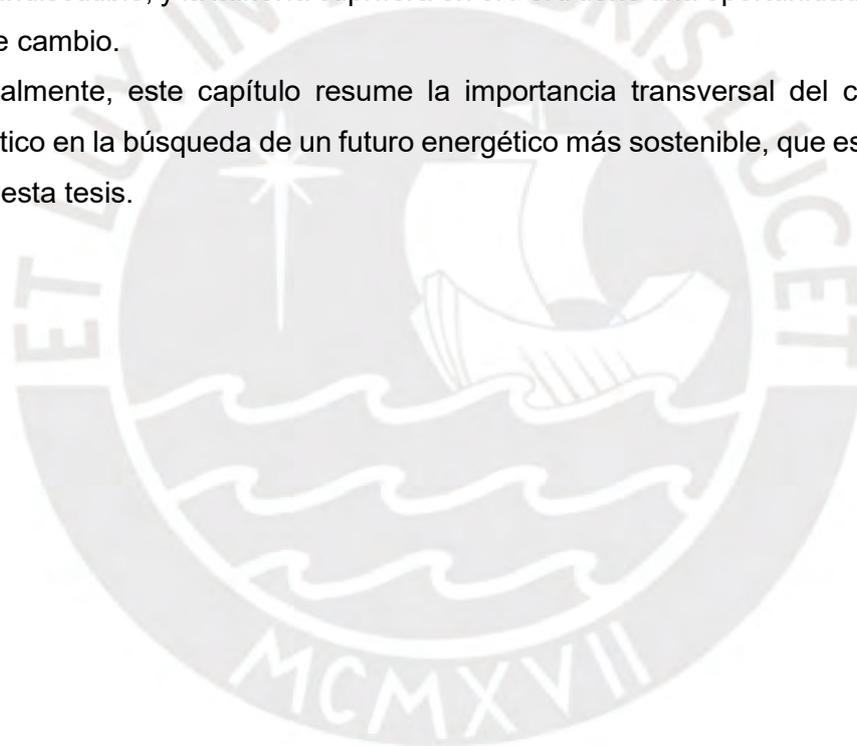
Esto dependerá, por un lado, de la industria minera que debe suministrar los minerales críticos mediante el uso eficiente de la energía en todo el ciclo de producción. Además, se necesitará una diversificación en la generación de energía mediante el aprovechamiento de recursos renovables. También es importante considerar las variaciones en el comportamiento de los usuarios finales, promover nuevas acciones orientadas al cuidado y la preservación ecológica y adoptar modelos de inversión más sostenibles y resilientes.

La transición hacia energías limpias es un tema de relevancia global. La seguridad energética, la sostenibilidad y la mitigación de la huella de carbono son preocupaciones compartidas por muchos países y organizaciones internacionales. En este contexto, los minerales críticos desempeñan un rol crucial, ya que son esenciales para la fabricación de baterías, paneles solares, turbinas eólicas, electromovilidad y otros dispositivos clave.

Aunque la investigación se centra en la eficiencia energética en la producción del concentrado de cobre, los minerales críticos están intrínsecamente relacionados con esta eficiencia. La producción y el uso eficiente de estos minerales son fundamentales para reducir la huella de carbono en toda la cadena de valor.

La falta de minerales críticos podría obstaculizar el desarrollo efectivo de tecnologías limpias. Por lo tanto, el papel del cobre en la transición hacia energías limpias es indiscutible, y la minería cuprífera en el Perú tiene una oportunidad única para liderar este cambio.

Finalmente, este capítulo resume la importancia transversal del cobre como mineral crítico en la búsqueda de un futuro energético más sostenible, que es el objetivo central de esta tesis.



Capítulo 6

6.1 Metodología del análisis

El desarrollo de este capítulo pasa por la implementación de programas y la adopción de mejoras tecnológicas que se establecerán líneas abajo. Para dicho objetivo se tiene que empezar por los datos referenciales e históricos en la producción del concentrado del cobre, los proyectos de inversiones en la minería del cobre a corto, mediano y largo plazo, así como el consumo de la energía en su producción.

Se calcula la contribución del cobre en el consumo global de energía del sector minero, ya que este mineral no solamente representa cerca del 50 % del valor total de los minerales metálicos exportados en el periodo 2020, sino que también es el más intensivo en consumo energético eléctrico (72,7 % del total de energía consumida en el año 2019).

Tabla 38. Valores históricos de producción, energía eléctrica consumida e inversión

	Producción del Cu ³³ TMF	Total de energía eléctrica en el sector minería ³⁴ GWh	Inversión en minería cuprífera mill. USD
2011	1 235 345	8 732,78	6 378
2012	1 298 761	9 016,67	7 498
2013	1 375 641	9 270,56	8 864
2014	1 377 642	10 390,00	8 079
2015	1 700 817	10 525,83	6 825
2016	2 353 859	14 665,28	3 334
2017	2 445 584	15 203,33	3 928
2018	2 437 035	15 841,39	4 962
2019	2 455 440	16 099,17	5 909
2020	2 153 952	14 522,98	4 327
2021	2 326 035	16 124,28	-

Fuente: Minem, 2022. Boletín estadístico minero, p. 17.

³³ Minem, 2022.

³⁴ Minem, 2021.

6.1.1 Cálculo proyectado en la producción del cobre 2021-2049

Tomando como referencia los datos históricos de inversión en la producción de concentrado de cobre, podemos calcular la proyección para el periodo 2021-2049. Estos cálculos están basados en la tabla anterior que muestra los valores históricos de los años 2011-2020. Es importante tener en cuenta que la proyección futura de la producción de cobre está estrechamente relacionada con las inversiones realizadas en esos años.

Sin embargo, se tendrá que tener presente que existen otras variables, tanto en el mercado interno como global, que pueden influir en el crecimiento de la producción de cobre y en la industria minera en general. Estas variables pueden acelerar o desacelerar el crecimiento de la producción de cobre y de la minería metálica en su conjunto.

Tabla 39. *Inversión, crecimiento y producción proyectados del cobre*

	Inversión en nuevos proyectos mill USD	Índice de crecimiento	Producción proyectada del Cu TMF
2021	1 600	1,030	2 326 035
2022	6 655	1,155	2 396 255
2023	200	1,159	2 688 326
2024	350	1,166	2 697 103
2025	490	1,175	2 712 464
2026	2 236	1,217	2 733 969
2027	2600	1,267	2 832 101
2028	2 500	1,313	2 946 209
2029	125	1,316	3 055 927
2030	1 600	1,346	3 061 413
2031	1 437	1,373	3 131 633
2032	1 290	1,373	3 194 699
2033	2 500	1,445	3 251 314
2034	590	1,456	3 361 033
2035	250	1,461	3 386 926
2036	1 530	1,489	3 397 898
2037		1,489	3 465 046
2038	600	1,501	3 465 046

2039		1,501	3 491 379
2040	3 500	1,567	3 491 379
2041		1,567	3 644 985
2042	1 860	1,602	3 644 985
2043		1,602	3 726 615
2044	5 000	1,696	3 726 615
2045		1,696	3 946 053
2046	655	1,708	3 946 053
2047		1,708	3 974 799
2048	655	1,721	3 974 799
2049		1,721	4 003 545

Fuente: elaboración propia.

Se considera una producción base del año 2021 de 2 326 035 TMF y, a partir de esta, se desarrollará la puesta en marcha de las inversiones anuales. Se hace una lectura de estas, la inversión anual genera un índice positivo en la producción del cobre. Este se calcula teniendo como dato referencial la estimación que se tiene del nuevo proyecto Quellaveco. Con una inversión que rodea los 5 300 millones de dólares, se tendrá un estímulo anual de 300 000 TMF (se estima que solo Quellaveco alcance la producción anual global total en un 10 % en TMF).³⁵ Entonces, para calcular el índice de crecimiento anual, necesitamos considerar que la inversión del primer año 2021 generaría $1\,600 \cdot 0,1/5300 = 0.0302$ TMF. Así, cada año se calcularían los índices de crecimiento hasta el año 2049, cuando las inversiones, sean establecidas según el Minem. Las inversiones proyectadas a partir del año 2029 son inversiones aleatorias.

6.1.2 Cálculo del consumo de energía proyectado del cobre 2021-2049

El consumo de la energía en la producción del cobre es muy intensivo por las características propias del mineral, por tanto, esta es una muestra representativa para poder analizar la proyección del consumo de energía de la minería. Como primera etapa, se considera un análisis BAU (todo sigue igual). Es válido saber que la energía que consume la minería tiene que ser eficiente y sustentable para ser competitiva.

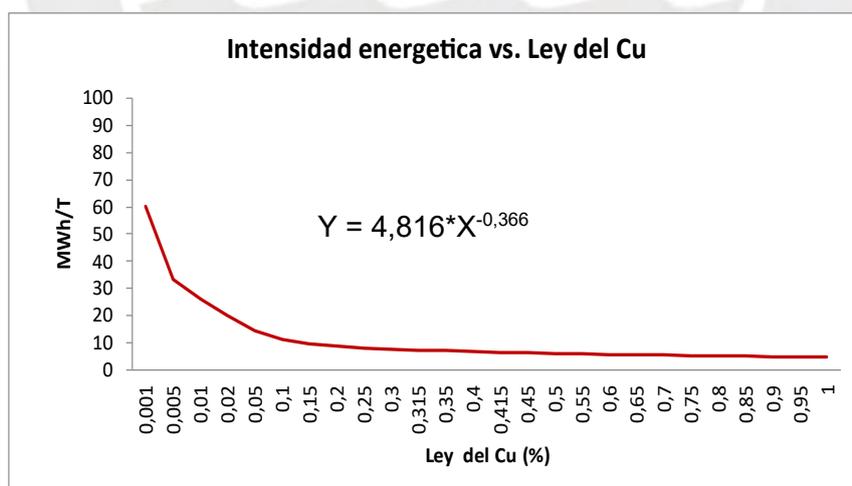
Para completar los datos de la tabla siguiente es muy importante definir la columna de la intensidad energética del cobre (MWh/TMF). Para esto, se necesita

³⁵ Wandlab, 2022.

conocer la ley del mineral proveniente de la mina y que, posteriormente, ingresa en la planta. Esta se denomina «ley de cabeza del cobre», la cual posee valores mineros estándares de relación entre la ley del mineral y la intensidad energética, y son obtenidos de la publicación «Disminución de las leyes del mineral en la minería metálica global», en la cual se cuantifica a nivel global la ley del mineral con el consumo energético para el caso del cobre.

Para nuestra investigación, se tomará como referencia la publicación de este artículo que relaciona la tendencia del consumo total de la energía en función de la ley del mineral $Y = 25,65 \cdot X^{-0,366}$ GJ/TM. Sin embargo, a este modelo de función se le asignará un coeficiente diferente, con lo que la nueva función igualaría a $Y = 17,38 \cdot X^{-0,366}$ GJ/TM ($Y = 4,816 \cdot X^{-0,366}$ MWh/TM), lo que interpreta mejor los valores que queremos obtener de la intensidad energética para el caso del Perú (analizando los valores históricos de la energía eléctrica consumida 2011-2020). Este nuevo valor teórico absoluto puede ser útil para comparar la intensidad energética empleada para diferentes procesos de producción del concentrado de cobre. Pero hay que tener presente que el valor de la intensidad energética para la producción del concentrado de cobre va a depender de otros factores, como la calidad del mineral y la tecnología empleada.

Ilustración 16. Indicador energético de la intensidad vs. ley del cobre



Fuente: Calvo, G. et. al., 2016. Disminución de las leyes del mineral en la minería metálica global.

Tomando como referencia un promedio para las leyes de cabeza de la minería peruana y el consumo de energía para la producción del concentrado de cobre local, se consideran los datos establecidos en la tabla siguiente:

Tabla 40. Promedio de la ley del cobre y de la energía consumida

Rango %	Promedio de energía MWh/T	Promedio ley
<0,3 – 0,5>	6,849	0,390

Para ello se considera una disminución promedio anual del 6 % de la ley del cobre respecto al año anterior durante los 10 primeros años y que esta se vuelva a repetir para este mismo periodo de años. De tal forma que la intensidad de energía consumida se refleja en la función ($Y = 4,816 * X^{-0,366}$).

Tabla 41. Consumo de la energía proyectada del cobre

Año	Producción de cobre TMF	Consumo de energía proyectado MWh	Intensidad energética Bau MWh/TMF	Ley de cabeza cobre %
2021	2 326 035	15 811 500	6,798	0,390
2022	2 396 255	16 661 920	6,953	0,367
2023	2 688 326	19 120 937	7,113	0,345
2024	2 697 103	19 622 758	7,275	0,324
2025	2 712 464	20 186 529	7,442	0,304
2026	2 733 969	20 812 604	7,613	0,286
2027	2 832 101	22 053 465	7,787	0,269
2028	2 946 209	23 467 497	7,965	0,253
2029	3 055 927	24 898 976	8,148	0,238
2030	3 061 413	25 515 003	8,334	0,223
2031	3 131 633	21 923 179	7,001	0,360
2032	3 194 699	22 876 936	7,161	0,338
2033	3 251 314	23 815 626	7,325	0,318
2034	3 361 033	25 183 207	7,493	0,299
2035	3 386 926	25 958 479	7,664	0,281

2036	3 397 898	26 639 070	7,840	0,264
2037	3 465 046	27 787 720	8,019	0,248
2038	3 465 046	28 424 191	8,203	0,233
2039	3 491 379	29 296 197	8,391	0,219
2040	3 491 379	29 967 220	8,583	0,206
2041	3 644 985	26 278 719	7,210	0,332
2042	3 644 985	26 880 627	7,375	0,312
2043	3 726 615	28 112 111	7,544	0,293
2044	3 726 615	28 756 013	7,716	0,276
2045	3 946 053	31 146 710	7,893	0,259
2046	3 946 053	31 860 118	8,074	0,244
2047	3 974 799	32 827 278	8,259	0,229
2048	3 974 799	33 579 180	8,448	0,215
2049	4 003 545	34 596 715	8,642	0,202

Una vez habiendo obtenido las proyecciones de los consumos energéticos se procede a calcular las proyecciones de las emisiones de CO₂eq. Con la relación de correspondencia $CO_2eq = FE * MWh$.

Tabla 42. Factor de emisión (FE) de los GEI asociados a la producción de las fuentes primarias del SEIN 2021-2049

Año	FE tCO ₂ eq/MWh
2018	0,150

Fuente: Minem, 2019.

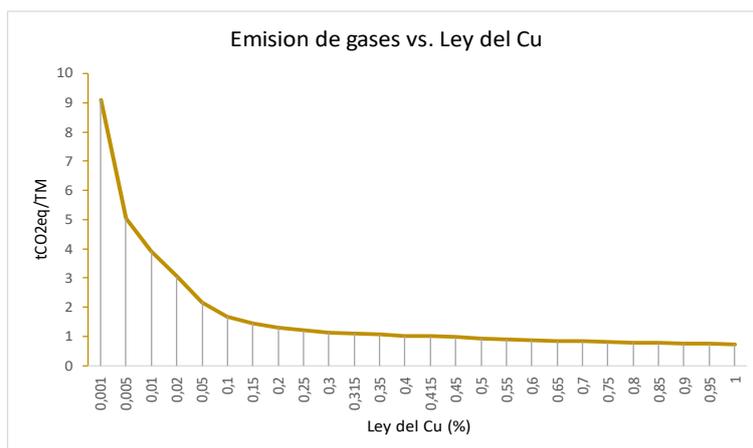
Tabla 43. Proyección de la emisión de alcance 2 de los gases CO₂

Año	Consumo de energía proyectado MWh	GEI emitidos de alcance 2 tCO ₂ eq
2021	15 811 500	2 387 537
2022	16 661 920	2 515 950
2023	19 120 937	2 887 261
2024	19 622 758	2 963 036

2025	20 186 529	3 048 166
2026	20 812 604	3 142 703
2027	22 053 465	3 330 073
2028	23 467 497	3 543 592
2029	24 898 976	3 759 745
2030	25 515 003	3 852 765
2031	21 923 179	3 310 400
2032	22 876 936	3 454 417
2033	23 815 626	3 596 160
2034	25 183 207	3 802 664
2035	25 958 479	3 919 730
2036	26 639 070	4 022 500
2037	27 787 720	4 195 946
2038	28 424 191	4 292 053
2039	29 296 197	4 423 726
2040	29 967 220	4 525 050
2041	26 278 719	3 968 087
2042	26 880 627	4 058 975
2043	28 112 111	4 244 929
2044	28 756 013	4 342 158
2045	31 146 710	4 703 153
2046	31 860 118	4 810 878
2047	32 827 278	4 956 919
2048	33 579 180	5 070 456
2049	34 596 715	5 224 104

De la curva exponencial de la intensidad energética se obtiene la correspondiente curva de emisiones $Y = 0,727 * X^{-0,366} \text{ tCO}_2\text{eq/}^{\text{TM}}$

Ilustración 17. Indicador de emisiones vs. ley de cobre



6.2 Discusión de los resultados del análisis

La discusión sobre la producción del concentrado de cobre y la energía consumida en sus diferentes etapas se viene desarrollando a través de los años. A todo esto, en la última década, «el consumo de la energía respecto a la producción del concentrado de cobre se incrementó notablemente».³⁶ Es ahí donde la explicación del fenómeno de la ley del cobre se hace imperativa. Es necesario comprender cómo varían el consumo de la energía y las emisiones de CO₂ en relación con la ley del cobre— la cual, en el transcurrir de los años, ha disminuido significativamente—. Así, es importante contextualizar por las siguientes razones:

a. Eficiencia energética: la comprensión de cómo el consumo de energía se modifica bajo la ley del cobre, que permite identificar patrones y tendencias que pueden ayudar a la mejoría de la eficiencia energética en la producción de cobre. Al conocer los vínculos entre la ley del mineral y el consumo de energía, se pueden implementar estrategias y tecnologías para reducir el consumo de energía en operaciones mineras de baja ley. Esto puede incluir la optimización de procesos, la implementación de tecnologías más eficientes y el desarrollo de prácticas de gestión de energía sostenibles.

b. Disminución de emisiones de CO₂: están estrechamente asociadas al consumo de energía en la producción de cobre, cuanto mayor sea el consumo de energía mayor será la generación de emisiones de CO₂. Comprender cómo las emisiones de CO₂ varían en relación con la ley del cobre permite identificar las etapas y procesos de producción que tienen un mayor impacto en las emisiones y así desarrollar

³⁶ Calvo, G.; et. al., 2016.

estrategias para reducir y mitigar esas emisiones. Esto puede incluir la creación o aplicación de tecnologías más limpias, la implementación de energías renovables, la captura y almacenamiento de carbono, entre otros enfoques.

c. Sostenibilidad y responsabilidad ambiental: en un contexto de creciente conciencia ambiental y demanda por prácticas sostenibles, comprender la relación entre la ley del cobre, el consumo de energía y las emisiones de CO₂ es esencial para garantizar la sostenibilidad de la industria del cobre. Por ello, las mineras tienen una mayor presión por reducir su huella ambiental y cumplir con las regulaciones, además de los estándares ambientales. Al comprender cómo la ley del cobre afecta el consumo de energía y las emisiones, se pueden tomar medidas para minimizar el impacto ambiental y operar de manera más responsable.

6.2.1 Implementación de programas y mejoras tecnológicas para la producción de concentrado de cobre

Actualmente, la industria minera está experimentando cambios tecnológicos significativos en el ámbito energético. Este sector desempeña un papel crucial en la transición energética gracias a la producción de minerales críticos como el cobre (Cu), níquel (Ni), zinc (Zn), litio (Li) y otros. Estos minerales son necesarios para la infraestructura de sectores como la movilidad, los parques eólicos, los sistemas solares y otras energías renovables no convencionales que se desarrollarán en el futuro con el objetivo de alcanzar una industria con emisiones cero.

Conscientes de este panorama, se están implementando programas y mejoras tecnológicas en la producción de concentrado de cobre. Estas iniciativas buscan optimizar los procesos, minimizar el consumo de energía, disminuir los impactos ambientales y optimar la eficiencia en general. La adopción de tecnologías innovadoras y sostenibles permitirá a la industria minera avanzar hacia una producción más limpia y responsable, con lo que se contribuirá a los objetivos de la transición energética.

6.2.1.1 Implementación del sistema de gestión de la energía (SGE)

El objetivo es implementar un sistema mediante un plan energético integral para mantener y operar, basados en planificación, soluciones de tecnologías modernas. Esto se lograría a través de simulaciones tecnológicas y de tener un seguimiento de continuidad en la mejora de objetivos de la eficiencia energética. El éxito del plan de SGE depende un plan multidisciplinario con la participación de profesionales especializados que vayan gestionando el cumplimiento de las etapas técnicas.

Asimismo, se debe cuantificar un estudio base del consumo de energía por proceso y equipo. Mediante cambios y avances técnicos se podrán evaluar las escalas del mejoramiento en la eficiencia energética para luego hacer la validación y el seguimiento continuo de las mejoras implementadas.

Tabla 44. *Implementación con escenario SGE*

Implementación	Consumo eléctrico %	Índice de ahorro %
SGE	100	25

Nota: dato propio del autor para alcanzar el objetivo de ahorro de energía del 10 % en los primeros 10 años, se necesita considerar el índice de ahorro o tasa de rendimiento del 25%.

Tabla 45. *Potencial objetivo con escenario SGE*

SGE	2021-2030 %	2031-2040 %	2041-2049 %
Potencial objetivo	40	75	100

Tabla 46. *Potencial objetivo con escenario SGE y RER*

RER	2021-2030 %	2031-2040 %	2041-2049 %
Potencial objetivo	10	30	40

Tabla 47. Resultados del ahorro de energía y reducción de emisiones con la implementación del SGE

Año	Consumo de energía BAU MWh	GEI emitidos BAU tCO ₂ eq	Ahorro SGE MWh	Emisión total tCO ₂ eq	Reducción emisión SGE tCO ₂ eq	Ingreso renovables MWh	Reducción emisión RER tCO ₂ eq	Reducción emisión SGE/RER tCO ₂ eq
2021	15 811 500	2 387 537	378 457	2 330 390	57 147	378 457	57 147	114 294
2022	16 661 920	2 515 950	756 913	2 401 656	114 294	756 913	114 294	228 588
2023	19 120 937	2 887 261	1 135 370	2 715 821	171 441	1 135 370	171 441	342 882
2024	19 622 758	2 963 036	1 513 827	2 734 449	228 588	1 513 827	228 588	457 176
2025	20 186 529	3 048 166	1 892 284	2 762 431	285 735	1 892 284	285 735	571 470
2026	20 812 604	3 142 703	2 270 740	2 799 821	342 882	2 270 740	342 882	685 764
2027	22 053 465	3 330 073	2 649 197	2 930 044	400 029	2 649 197	400 029	800 057
2028	23 467 497	3 543 592	3 027 654	3 086 416	457 176	3 027 654	457 176	914 351
2029	24 898 976	3 759 745	3 406 110	3 245 423	514 323	3 406 110	514 323	1 028 645
2030	25 515 003	3 852 765	3 784 567	3 281 296	571 470	3 784 567	571 470	1 142 939
2031	21 923 179	3 310 400	4 777 137	2 589 052	721 348	8 529 740	1 287 991	2 009 338
2032	22 876 936	3 454 417	5 211 422	2 667 493	786 925	9 305 170	1 405 081	2 192 005
2033	23 815 626	3 596 160	5 645 707	2 743 658	852 502	10 080 601	1 522 171	2 374 673
2034	25 183 207	3 802 664	6 079 992	2 884 585	918 079	10 856 032	1 639 261	2 557 340
2035	25 958 479	3 919 730	6 514 277	2 936 075	983 656	11 631 463	1 756 351	2 740 007
2036	26 639 070	4 022 500	6 948 562	2 973 267	1 049 233	12 406 894	1 873 441	2 922 674
2037	27 787 720	4 195 946	7 382 847	3 081 136	1 114 810	13 182 325	1 990 531	3 105 341

2038	28 424 191	4 292 053	7 817 132	3 111 666	1 180 387	13 957 756	2 107 621	3 288 008
2039	29 296 197	4 423 726	8 251 418	3 177 762	1 245 964	14 733 187	2 224 711	3 470 675
2040	29 967 220	4 525 050	8 685 703	3 213 509	1 311 541	15 508 617	2 341 801	3 653 342
2041	26 278 719	3 968 087	9 136 009	2 588 549	1 379 537	14 617 614	2 207 260	3 586 797
2042	26 880 627	4 058 975	9 571 057	2 613 745	1 445 230	15 313 691	2 312 367	3 757 597
2043	28 112 111	4 244 929	10 006 105	2 734 007	1 510 922	16 009 767	2 417 475	3 928 397
2044	28 756 013	4 342 158	10 441 153	2 765 544	1 576 614	16 705 844	2 522 582	4 099 197
2045	31 146 710	4 703 153	10 876 201	3 060 847	1 642 306	17 401 921	2 627 690	4 269 996
2046	31 860 118	4 810 878	11 311 249	3 102 879	1 707 999	18 097 998	2 732 798	4 440 796
2047	32 827 278	4 956 919	11 746 297	3 183 228	1 773 691	18 794 075	2 837 905	4 611 596
2048	33 579 180	5 070 456	12 181 345	3 231 073	1 839 383	19 490 152	2 943 013	4 782 396
2049	34 596 715	5 224 104	12 616 393	3 319 029	1 905 075	20 186 229	3 048 121	4 953 196

Nota: ver Anexo 3, donde se calculan los valores numéricos para hallar el ahorro energético (MWh) y reducción de emisiones (tCO₂eq).

6.2.1.2 Implementación de mejoras tecnológicas por etapas

Se tratará de una simulación de la implementación operativa y técnica en áreas críticas del uso de la energía, como la etapa en el concentrado del mineral, la cual se gestionará de acuerdo con las necesidades o prioridades para poder optimizar los equipos para un menor consumo de energía. Las etapas de mejora no necesariamente siguen una planificación integral, sino que se van desarrollando de acuerdo con las prioridades de la gestión. Como toda mejora técnica, se sostiene sobre la base del consumo energético histórico y luego con la aplicación de las mejoras podrá ser evaluado, mediante el seguimiento continuo de los resultados conseguidos, para continuar con la implementación de las áreas comprometidas en el mayor uso de energía.

6.2.1.2.1. Recambio y control del proceso

Se tomó como modelo el manual de eficiencia de Donald R. Wulfinghoff³⁷ sobre el recambio de los motores o máquinas rotativas por equipos de alta eficiencia (>0,95). En ese sentido, es necesario la implementación de la automatización, monitoreo y control de máquinas rotativas y de bombeo.

Se nombraron proyectos mineros implementados:

- Implementación de un sistema de control en circuito de molienda.
- Comprobación de eficiencia en subetapas de chancado y de moliendas.
- Incorporación de Gearless Mill Drive (GMD).
- Soluciones de control para molinos SAG, cuyo promedio de ahorro es de alrededor del 20 % de su consumo.

6.2.1.2.2. Nuevas Tecnologías

Estos incluyen la digitalización, *data science*, simulación de escenarios, modelamientos predictivos. Su índice de ahorro se consideró 6,5 % de su consumo.

Tabla 48. *Implementación con escenario de mejoras tecnológicas*

Implementación	Consumo eléctrico %	Índice de ahorro %
----------------	------------------------	-----------------------

³⁷ Minem, 2020.

Mejora de motores	20	20
Conminución (chancado, molienda)	55	6.5
Iluminación	5	55
Uso adecuado	20	45

Nota: dato sobre mejora de motores del Minem, *Minería metálica. Guía orientación del uso eficiente de la energía y de diagnóstico energético*, pp. 17-51.

Tabla 49. *Potencial objetivo con luminarias led*

Iluminación led	2021-2030	2031-2040	2041-2049
	%	%	%
Potencial objetivo	70	95	100

Tabla 50. *Potencial objetivo con mejora de motores*

Mejora de motores	2021-2030	2031-2040	2041-2049
	%	%	%
Potencial objetivo	40	75	100

Tabla 51. *Potencial objetivo con mejoras en la conminución*

Mejora conminución	2021-2030	2031-2040	2041-2049
	%	%	%
Potencial objetivo	40	75	100

Tabla 52. Resultados del ahorro de energía con la implementación de mejoras tecnológicas

Año	Implementación de mejoras tecnológicas							
	Consumo de energía con BAU	Uso adecuado	Motores	Digitalización conminución	Iluminación	Acumulado Ahorro	Rendimiento	Total Ahorro
	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh		MWh
2021	15 811 500	136 244	60 553	54 119	72 853	323 770	0,85	275 204
2022	16 661 920	272 489	121 106	108 239	145 706	647 539	0,85	550 409
2023	19 120 937	408 733	181 659	162 358	218 559	971 309	0,85	825 613
2024	19 622 758	544 978	242 212	216 477	291 412	1 295 079	0,85	1 100 817
2025	20 186 529	681 222	302 765	270 597	364 265	1 618 849	0,85	1 376 021
2026	20 812 604	817 466	363 318	324 716	437 117	1 942 618	0,85	1 651 226
2027	22 053 465	953 711	423 872	378 835	509 970	2 266 388	0,85	1 926 430
2028	23 467 497	1 089 955	484 425	432 954	582 823	2 590 158	0,85	2 201 634
2029	24 898 976	1 226 200	544 978	487 074	655 676	2 913 927	0,85	2 476 838
2030	25 515 003	1 362 444	605 531	541 193	728 529	3 237 697	0,85	2 752 043
2031	21 923 179	1 719 769	764 342	683 131	587 076	3 754 318	0,9	3 378 886
2032	22 876 936	1 876 112	833 827	745 233	640 447	4 095 620	0,9	3 686 058
2033	23 815 626	2 032 454	903 313	807 336	693 818	4 436 921	0,9	3 993 229
2034	25 183 207	2 188 797	972 799	869 439	747 188	4 778 223	0,9	4 300 401
2035	25 958 479	2 345 140	1 042 284	931 542	800 559	5 119 524	0,9	4 607 572

2036	26 639 070	2 501 482	1 111 770	993 644	853 929	5 460 826	0,9	4 914 743
2037	27 787 720	2 657 825	1 181 256	1 055 747	907 300	5 802 128	0,9	5 221 915
2038	28 424 191	2 814 168	1 250 741	1 117 850	960 671	6 143 429	0,9	5 529 086
2039	29 296 197	2 970 510	1 320 227	1 179 953	1 014 041	6 484 731	0,9	5 836 258
2040	29 967 220	3 126 853	1 389 712	1 242 055	1 067 412	6 826 033	0,9	6 143 429
2041	26 278 719	3 288 963	1 461 761	1 306 449	763 682	6 820 856	0,95	6 479 813
2042	26 880 627	3 445 580	1 531 369	1 368 661	800 048	7 145 659	0,95	6 788 376
2043	28 112 111	3 602 198	1 600 977	1 430 873	836 414	7 470 462	0,95	7 096 938
2044	28 756 013	3 758 815	1 670 584	1 493 085	872 780	7 795 264	0,95	7 405 501
2045	31 146 710	3 915 432	1 740 192	1 555 297	909 146	8 120 067	0,95	7 714 064
2046	31 860 118	4 072 050	1 809 800	1 617 509	945 512	8 444 870	0,95	8 022 626
2047	32 827 278	4 228 667	1 879 407	1 679 720	981 877	8 769 672	0,95	8 331 189
2048	33 579 180	4 385 284	1 949 015	1 741 932	1 018 243	9 094 475	0,95	8 639 751
2049	34 596 715	4 541 901	2 018 623	1 804 144	1 054 609	9 419 278	0,95	8 948 314

Nota: ver Anexo 4, donde se calculan los valores numéricos para hallar el ahorro energético (MWh).

6.2.1.3. Ingreso de las RER y sus efectos en la reducción de gases

Al incorporar fuentes de energías renovables (RER) en el sistema eléctrico, sustituirá un porcentaje de la energía consumida, lo cual tendrá efectos directos en el descenso de las emisiones de gases de efecto invernadero. Es importante tener en cuenta que, durante esta evaluación, no se considerarán las pérdidas ligadas a la transmisión y distribución de la energía eléctrica.

La adopción de fuentes de energías renovables, como la solar y la eólica, contribuye a la disminución de la dependencia de combustibles fósiles y, por ende, a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Estas tecnologías de generación limpia tienen un menor impacto ambiental y ayudan a mitigar el cambio climático. Ello se visualiza en la siguiente tabla:



Tabla 53. Resultados de la reducción de la emisión de gases CO₂eq con la implementación de mejoras tecnológicas

Año	GEI emitidos BAU tCO ₂ eq	Emisión total con mejoras tCO ₂ eq	Reducción de emisión con mejoras tCO ₂ eq	Reducción de emisión RER tCO ₂ eq	Reducción emisión con mejoras / RER tCO ₂ eq
2021	2 387 537	2 345 981	41 556	57 147	98 703
2022	2 515 950	2 432 838	83 112	114 294	197 406
2023	2 887 261	2 762 594	124 668	171 441	296 108
2024	2 963 036	2 796 813	166 223	228 588	394 811
2025	3 048 166	2 840 387	207 779	285 735	493 514
2026	3 142 703	2 893 368	249 335	342 882	592 217
2027	3 330 073	3 039 182	290 891	400 029	690 920
2028	3 543 592	3 211 145	332 447	457 176	789 622
2029	3 759 745	3 385 743	374 003	514 323	888 325
2030	3 852 765	3 437 207	415 558	571 470	987 028
2031	3 310 400	2 800 188	510 212	1 287 991	1 798 202
2032	3 454 417	2 897 823	556 595	1 405 081	1 961 675
2033	3 596 160	2 993 182	602 978	1 522 171	2 125 148
2034	3 802 664	3 153 304	649 360	1 639 261	2 288 621
2035	3 919 730	3 223 987	695 743	1 756 351	2 452 094
2036	4 022 500	3 280 373	742 126	1 873 441	2 615 567

2037	4 195 946	3 407 437	788 509	1 990 531	2 779 040
2038	4 292 053	3 457 161	834 892	2 107 621	2 942 513
2039	4 423 726	3 542 451	881 275	2 224 711	3 105 986
2040	4 525 050	3 597 392	927 658	2 341 801	3 269 459
2041	3 968 087	2 989 635	978 452	2 207 260	3 185 711
2042	4 058 975	3 033 930	1 025 045	2 312 367	3 337 412
2043	4 244 929	3 173 291	1 071 638	2 417 475	3 489 113
2044	4 342 158	3 223 927	1 118 231	2 522 582	3 640 813
2045	4 703 153	3 538 330	1 164 824	2 627 690	3 792 514
2046	4 810 878	3 599 461	1 211 417	2 732 798	3 944 214
2047	4 956 919	3 698 910	1 258 009	2 837 905	4 095 915
2048	5 070 456	3 765 854	1 304 602	2 943 013	4 247 615
2049	5 224 104	3 872 909	1 351 195	3 048 121	4 399 316

Nota: ver Anexo 4, donde se calculan los valores numéricos para hallar la reducción de emisiones (tCO₂eq)

6.3. Representación gráfica de los resultados del análisis

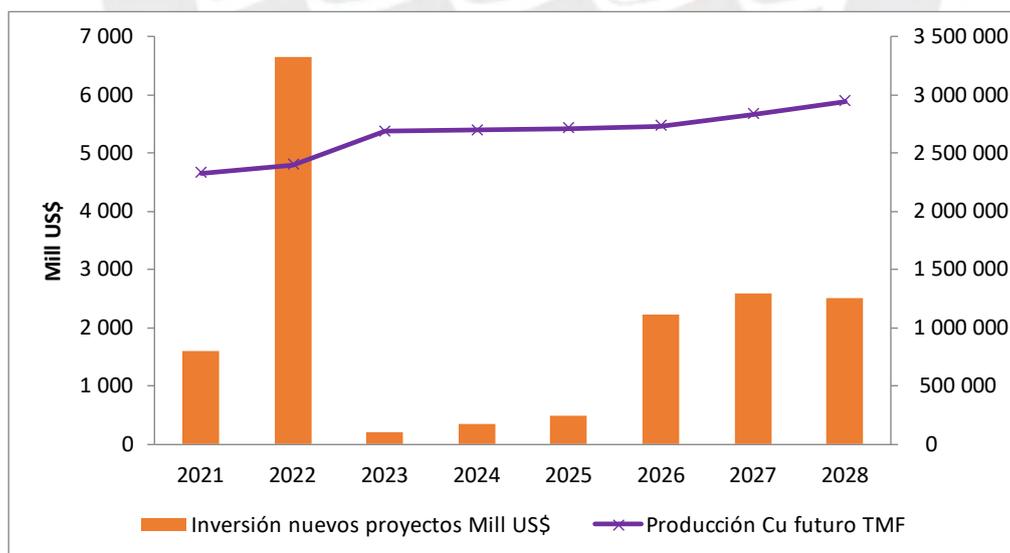
En este capítulo se visualizarán los resultados de los valores cuantitativos escritos en tablas del capítulo anterior. Lo que nos permite mostrar mediante la vía gráfica, las diferentes etapas de los parámetros analizados que intervienen en el desarrollo para mejorar la eficiencia energética en el proceso de la proyección en la producción del concentrado de cobre.

6.3.1. Proyección de la producción anual del concentrado de cobre 2021-2049

Es necesario examinar la cartera de proyectos mineros de largo plazo tanto en Greendfield como Brownfield desde el 2021 hasta después del 2029. Estas inversiones tendrán una incidencia directa sobre el índice de crecimiento en la proyección de la producción del cobre (ver tabla 39).

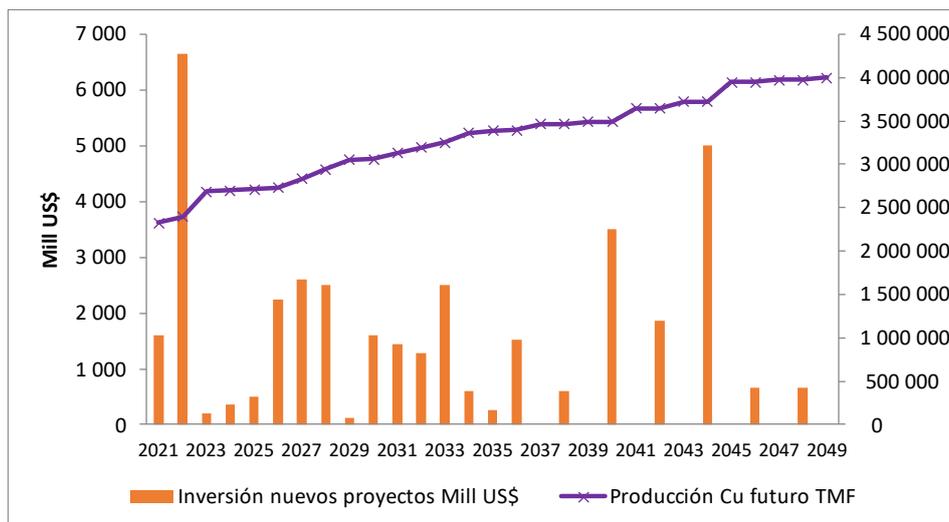
Según la proyección de la producción del concentrado del cobre al año 2028, esta crecerá aproximadamente el 26,7 % respecto del 2021.

Ilustración 18. Tendencias del crecimiento en la producción anual cobre 2021-2028 (elaboración propia)



La proyección de la producción de cobre concentrado al año 2049 crecerá cerca al 72 % respecto al año 2021.

Ilustración 19. Tendencias del crecimiento en la producción anual cobre 2021-2049 (elaboración propia)



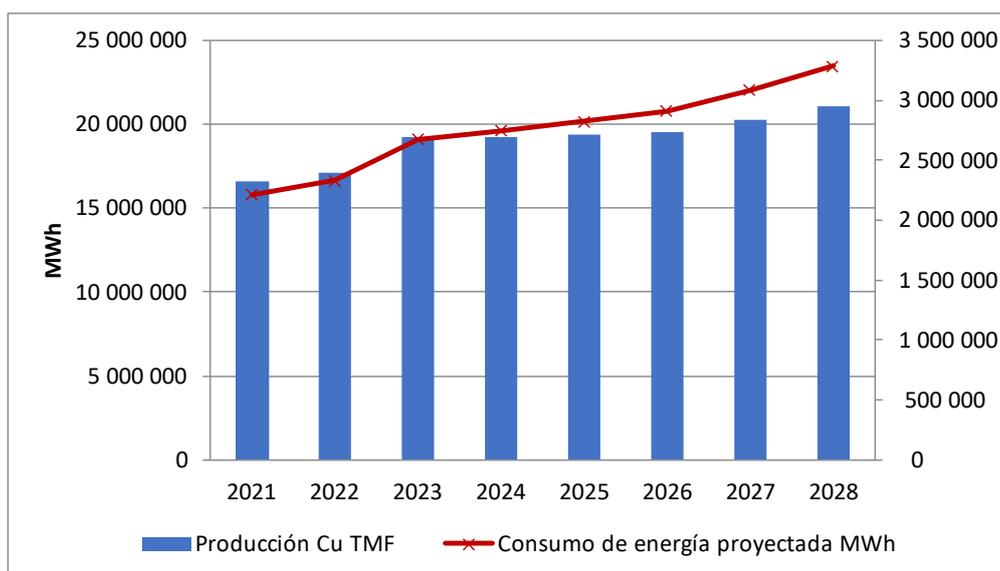
6.3.2. Proyección BAU del consumo de energía proyectado para la producción anual del cobre 2021-2049

Una vez obtenidos los datos vinculados a la producción, se llega a estimar la proyección del consumo de la energía para la producción del concentrado de cobre. Para esta etapa, se tomará en cuenta el recorrido de la cadena de producción del cobre, que va desde la conminución (chancado, molienda), seguido del proceso de la flotación (sulfuros de cobre) o lixiviación (óxidos de cobre).

- a. Chancadoras giratorias, de mandíbula, de cono, de impacto o de rodillos.
- b. Para los molinos, se pueden dividir en SAG, bolas y barras dependiendo del medio de molienda que utiliza.

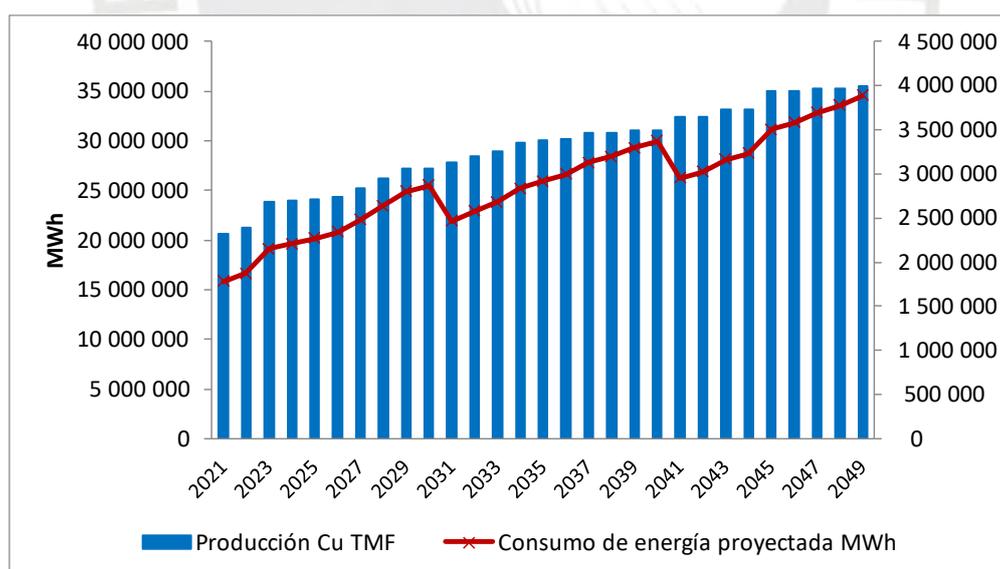
El consumo de energía del año 2028 para el proceso de la obtención del cobre concentrado crecerá alrededor del 48,4 % respecto al 2021 (ver tabla 41).

Ilustración 20. Consumo de la energía proyectada 2021-2028 (elaboración propia)



Para el año 2049, el crecimiento anual del consumo de energía en el proceso de la obtención del concentrado de cobre casi llegaría a duplicarse (34 596 715 MWh).

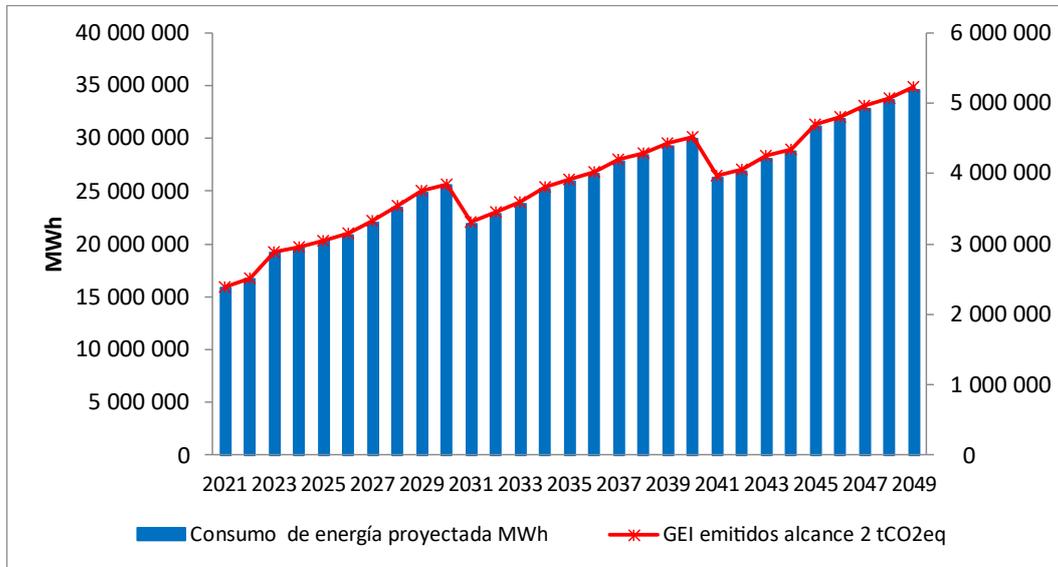
Ilustración 21. Consumo de la energía proyectada 2021-2049 (elaboración propia)



6.3.3. Emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) asociados 2021-2049

Para el año 2049, si no se toma ninguna medida respecto al calentamiento global, las emisiones anuales de GEI de alcance 2 del sector minero se habrán sobrepasado, al duplicarse a 5 224 104 tCO₂eq respecto al 2021 (ver tabla 43).

Ilustración 22. Emisión de gases de efecto invernadero (GEI) proyectado 2021-2049 (elaboración propia)

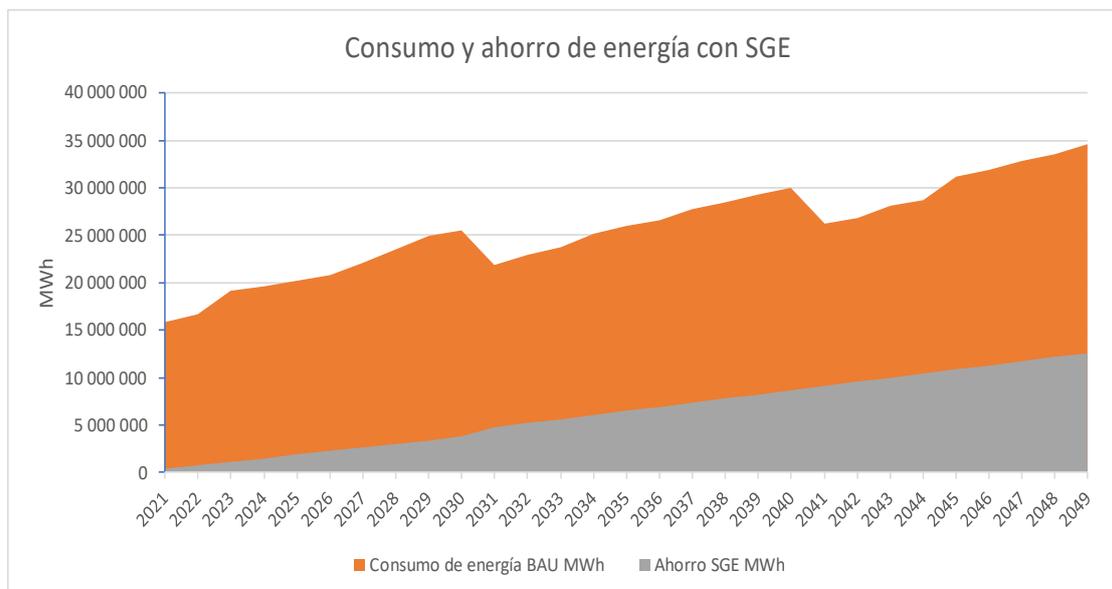


6.3.4. Proyección del consumo de energía en la producción del cobre bajo implementación de gestión y mejoras tecnológicas.

6.3.4.1 Mediante la implementación del Sistema de Gestión de la Energía (SGE)

En el periodo 2021-2049, al implementarse de manera planificada un sistema de gestión de eficiencia energética y tecnologías innovadoras integradas con herramientas digitales, se lograría ahorrar alrededor de 186 015 122 MWh de un total de 744 060 486 MWh, que sería el 25 % de ahorro (ver tabla 47).

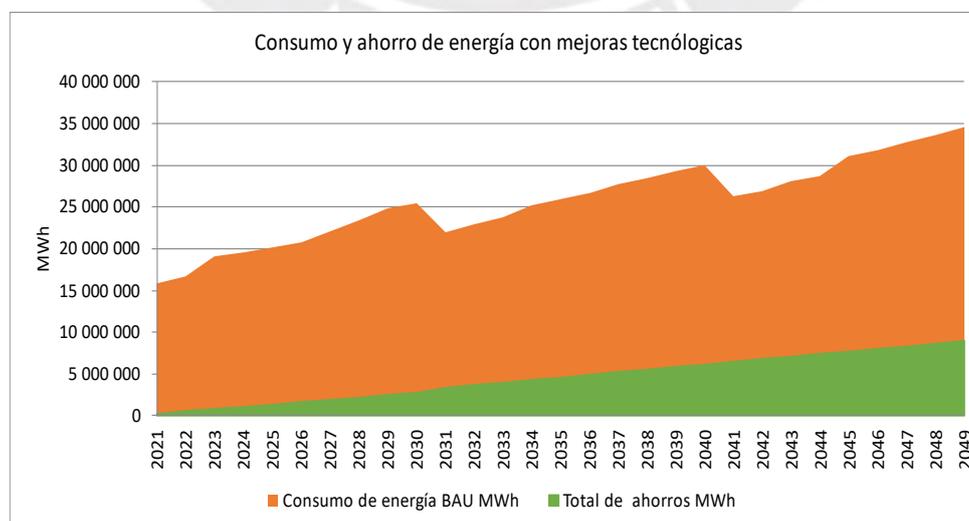
Ilustración 23. Implementación tecnológica y ahorro total de energía con SGE
(elaboración propia, ver desarrollo en anexo 3)



6.3.4.2. Mediante la Implementación mejoras tecnológicas por etapas

Luego de implementar en el periodo 2021-2049 mejoras tecnológicas gestionadas por etapas y con tecnologías renovadas para el cambio y recambio en los equipos complementados, así como integradas con herramientas digitales; se lograría ahorrar alrededor de 132 174 384 MWh, lo que sería el 17,78 % (ver tabla 52).

Ilustración 24. Implementación de mejoras tecnológicas por etapas para el ahorro total de energía (elaboración propia, ver desarrollo en anexo 4)

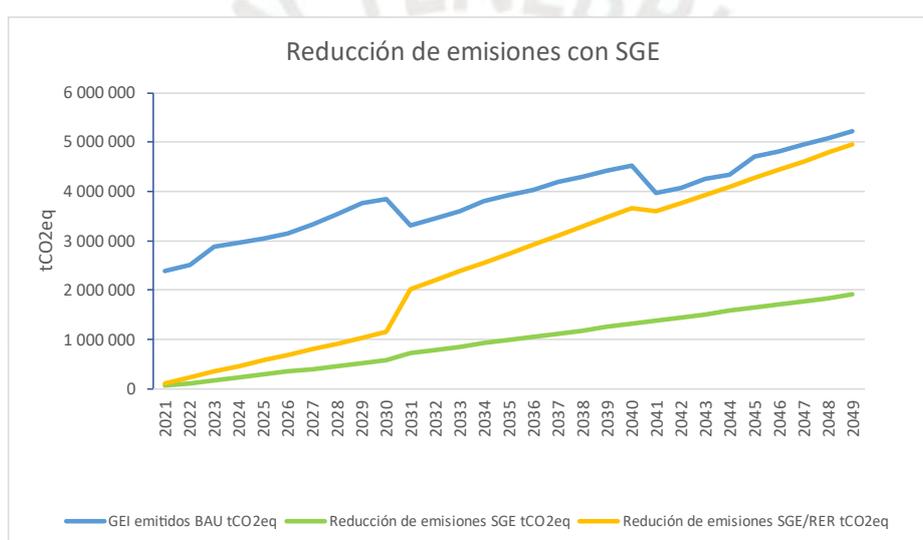


6.3.4.3 Impacto positivo de la minería sobre la reducción de emisión de gases 2021-2049

6.3.4.3.1. Mediante SGE

Con la implementación de un sistema de gestión de energía, se dejará de emitir a la atmósfera cerca de 28 088 283 tCO₂eq, que representa el 25 % en la mengua de la emisión de gases. Y, si a esta se incorporan fuentes de RER, se dejará de emitir alrededor de 73 029 537 tCO₂eq, que sería el 65 % de mitigación (tabla 47).

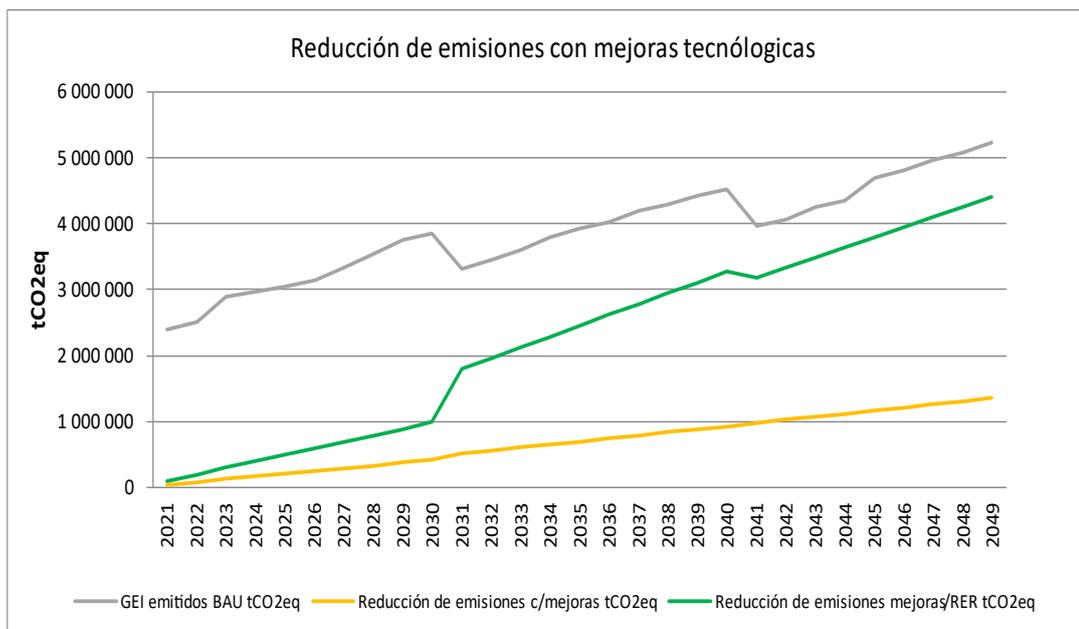
Ilustración 25. Reducción de emisiones de CO₂eq con SGE (elaboración propia, ver desarrollo en anexo 3)



6.3.4.3.2. Mediante Implementación de mejoras tecnológicas por etapas

Con la implementación por etapas, ya no se emitirá a la atmósfera cerca de 19 958 332 tCO₂eq que representa el 17.78 % en el descenso de la emisión de gases. Y si a esta se incorpora fuentes de RER se dejará de emitir alrededor de 64 899 585 tCO₂eq que sería el 58 % de mitigación (tabla 53).

Ilustración 26. Reducción de emisiones de CO₂eq con mejoras tecnológicas por etapas (elaboración propia, ver desarrollo anexo 4)



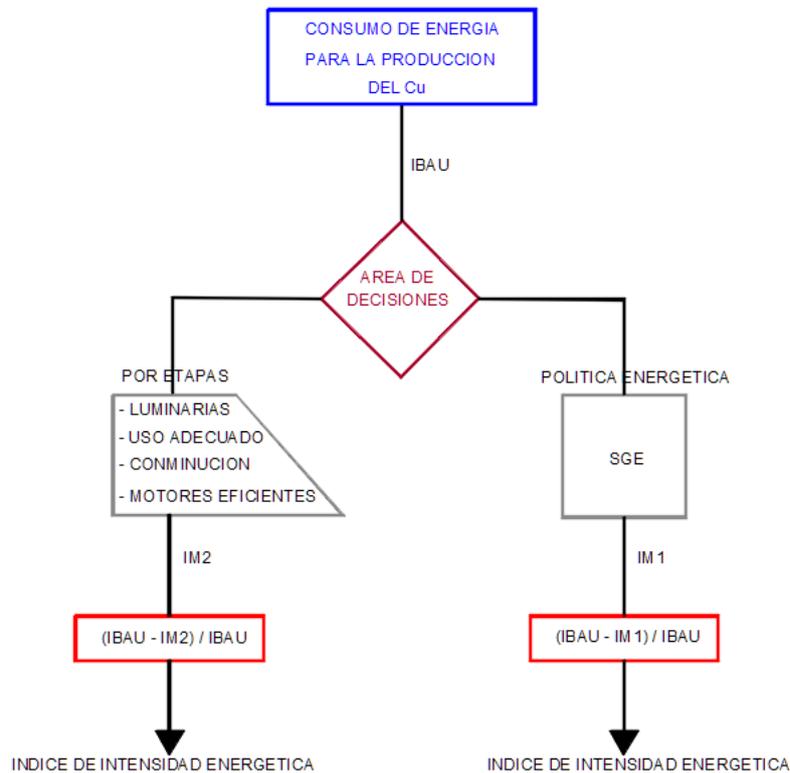
6.3.5. Cálculo y análisis del comportamiento de la intensidad energética en la producción del concentrado del cobre

Como resultado de las metas propuestas en las proyecciones globales de la industria minera, desde el ahorro energético por medio de un sistema de gestión inteligente hasta la aplicación de cambios innovadores en los procesos más importantes en la producción del concentrado de cobre, habría una reducción de la mitigación de emisiones; lo que tendría como resultado una industria minera cuprífera más sostenible, limpia y con una gestión financiera eficiente.

Los porcentajes de ahorro de energía eléctrica y mitigación de la muestra global obtenida se podrían replicar sobre escenarios locales como zonas mineras (norte, centro y sur) y minas específicas. Siempre en cuando estos conglomerados mineros tengan características similares en el tipo de minería (cielo abierto).

Cuando la ley del cobre disminuya, los costos acumulativos de la energía para la producción de la concentración del cobre subirán. Por tanto, la innovación tecnológica hará que la demanda de la energía disminuya de manera significativa. El ciclo de renovación de la ley del cobre se da aproximadamente cada 10 años. En ese sentido, el promedio en la disminución del índice de la intensidad energética con mejoras tecnológicas para los primeros 10 años será como se indica en la tabla y tendrá efectos sobre el índice de intensidad energética BAU.

Ilustración 27. Diagrama de flujo para calcular el índice de intensidad energética



I_{BAU} : Intensidad energética BAU (MWh/TM)

I_M : Intensidad energética mejorado (MWh/TM)

Es importante calcular el índice de intensidad energética $(I_{BAU} - I_M / I_{BAU})$, ya que este valor adimensional afecta de manera directa la ganancia o pérdida de la intensidad energética, cuyo nuevo valor modificara la función $Y = 4.816 * X^{-0.366}$ MWh/TM.

6.3.5.1. Implementando políticas energéticas SGE y mejoras tecnológicas por etapas para la reducción del indicador de intensidad energética

6.3.5.1.1. Evaluación y comparación de la intensidad energética MWh/T

Tabla 54. Reducción del índice de intensidad energética promedio con escenarios de SGE y Mejoras tecnológicas

	Disminución promedio
--	----------------------

Índice de intensidad energética	2021-2030	2031-2040	2041-2049
	%	%	%
SGE	9,43	25,48	35,69
Etapas	6,40	17,70	25,20

Ilustración 28. Reducción de la intensidad energética con SGE (elaboración propia, desarrollo de los datos de intensidad, descripción de solución en anexo 5)

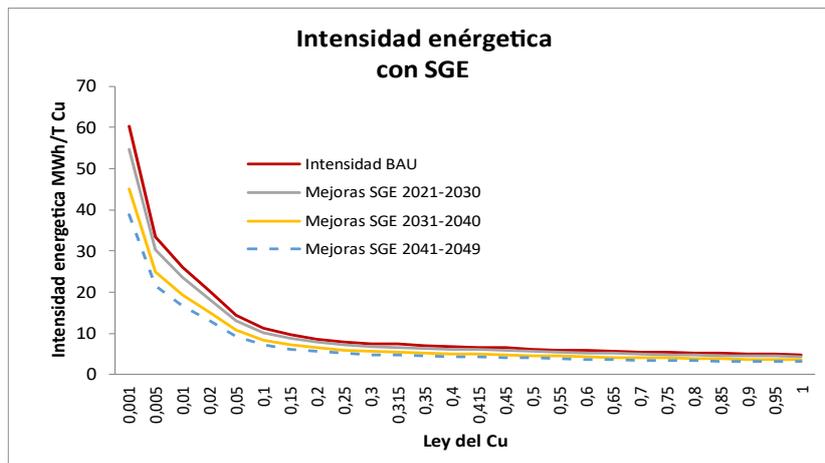
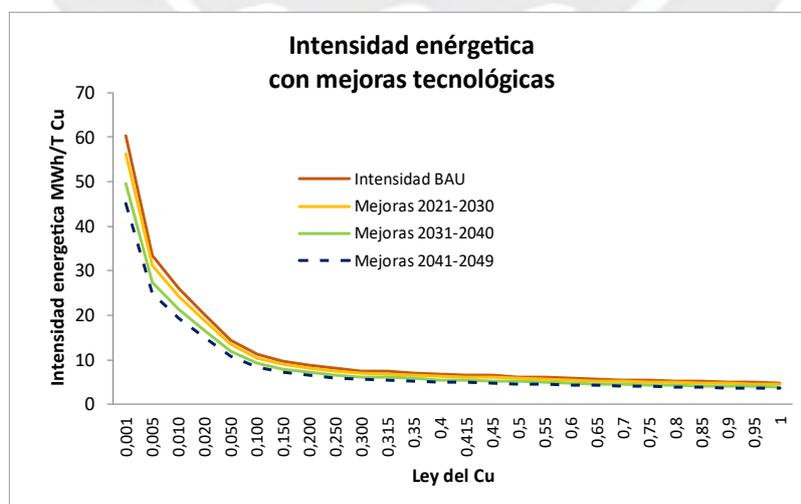


Ilustración 29. Reducción de la intensidad energética con mejoras tecnológicas (elaboración propia, desarrollo de los datos de intensidad, descripción de solución en anexo 6)



6.3.5.1.2. Evaluación y comparación de la intensidad de emisiones de CO₂eq/T

Tabla 55. Reducción del índice de intensidad de emisiones promedio con escenarios de SGE y mejoras tecnológicas.

Índice de intensidad de emisiones	Disminución promedio		
	2021-2030 %	2031-2040 %	2041-2049 %
SGE	9,43	25,48	35,69
Etapas	6,86	18,02	25,31

Ilustración 30. Reducción de la Intensidad de emisiones de CO₂ con SGE (elaboración propia, desarrollo de los datos de intensidad, descripción de solución en anexo 7)

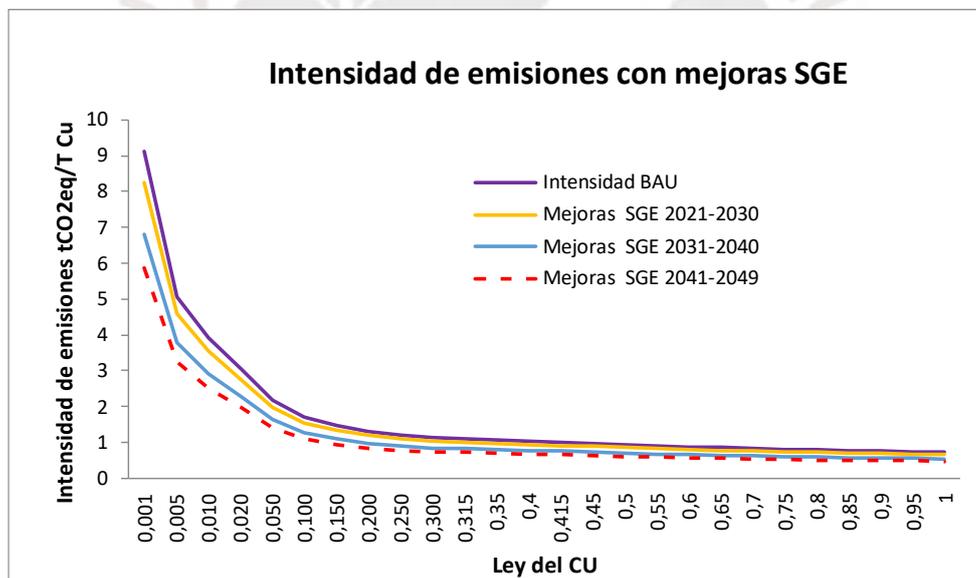
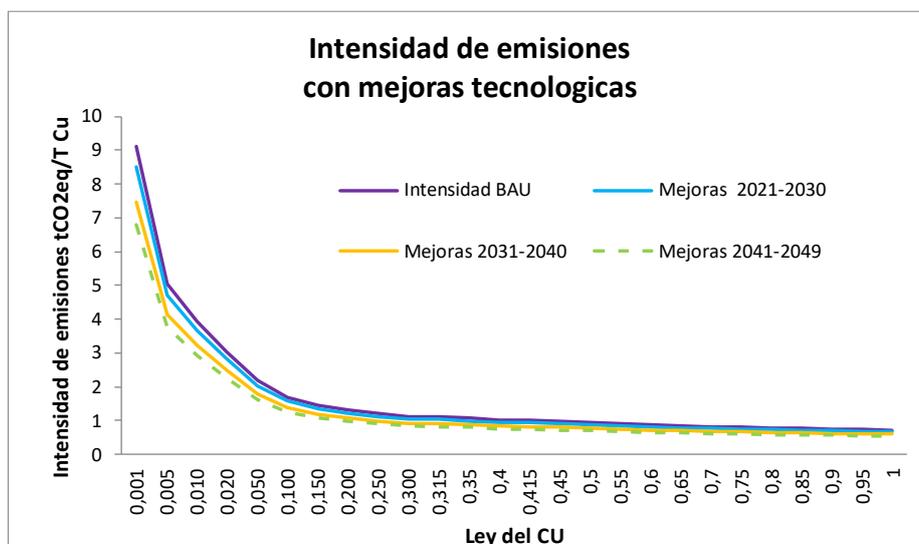


Ilustración 31. Reducción de la intensidad de emisiones de CO₂ con mejoras tecnológicas (elaboración propia, desarrollo de los datos de intensidad, descripción de solución en anexo 8)



6.3.5.2. Implementando políticas energéticas SGE y mejoras tecnológicas por etapas adicionalmente incorporando fuentes de energía no convencionales

Siguiendo el ciclo de 10 años en la demanda energética e incorporando a esta demanda fuentes de RER, se puede decir que la disminución de la intensidad de emisiones será significativa y solo dependerá de la implementación gradual que tendrán estas fuentes en el consumo de energía del sector minero.

Tabla 56. Reducción del índice de intensidad de emisiones con escenarios de SGE + RER y Mejoras tecnológicas + RER

Índice de intensidad de emisiones (CO ₂ eq/T)	Disminución promedio		
	2021-2030	2031-2040	2041-2049
	%	%	%
SGE + RER	18,90	71,10	92,80
Etapas + RER	16,29	63,52	82,42

Ilustración 32. Reducción de la intensidad de emisiones de CO2 con SGE y RER (elaboración propia, desarrollo de los datos de intensidad, descripción de solución en anexo 9)

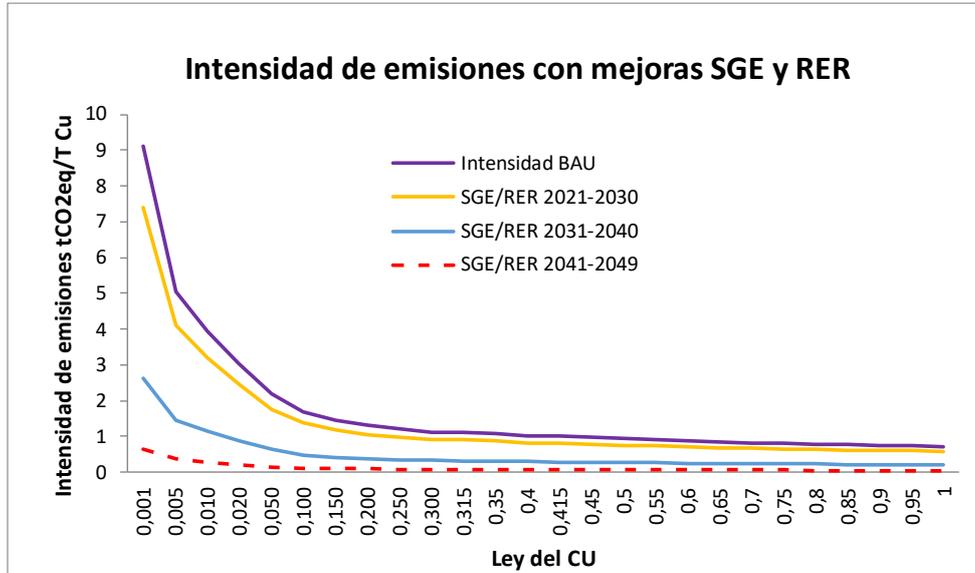
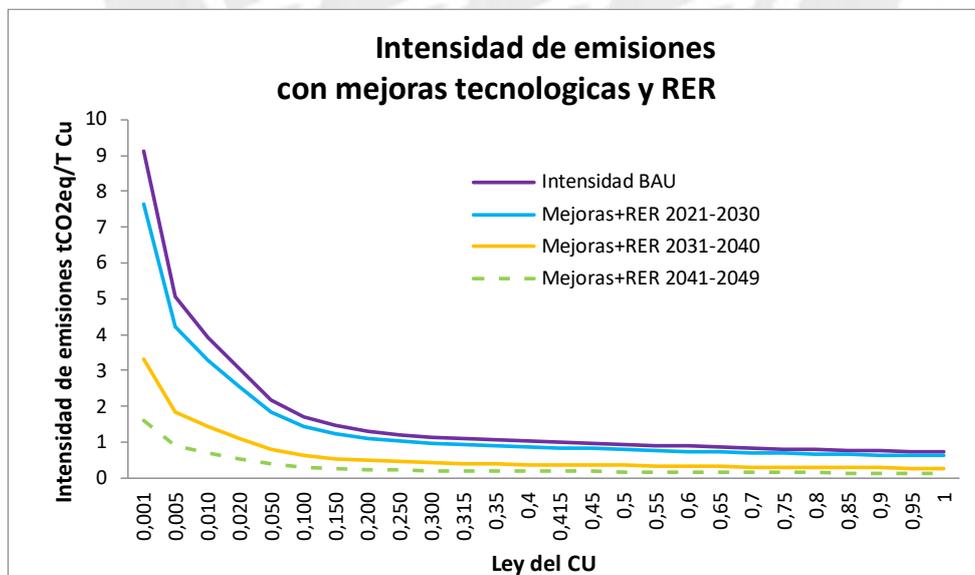


Ilustración 33. Reducción de la intensidad de emisiones CO2 con mejoras tecnológicas y RER (elaboración propia, desarrollo de los datos de intensidad, descripción de solución anexo en 10)



6.3.5.3. Evaluación del comportamiento de la intensidad energética por tecnología adoptada

Es el indicador que nos señala cómo la intensidad energética va cambiando con la adopción de diferentes escenarios (mejoras de gestión, tecnológicas y RER) respecto al escenario inicial o BAU. Vale decir que los datos calculados provienen de los promedios anuales de cada contexto.

La tabla de índice de intensidad que presenta el crecimiento decimal anual de las intensidades promedio BAU menos las intensidades mejoradas, respecto a las intensidades BAU. Estos valores serán usados para calcular la nueva curva de ajuste potencial con las disminuciones de las intensidades energéticas (intensidad MWh/T vs. ley del cobre).

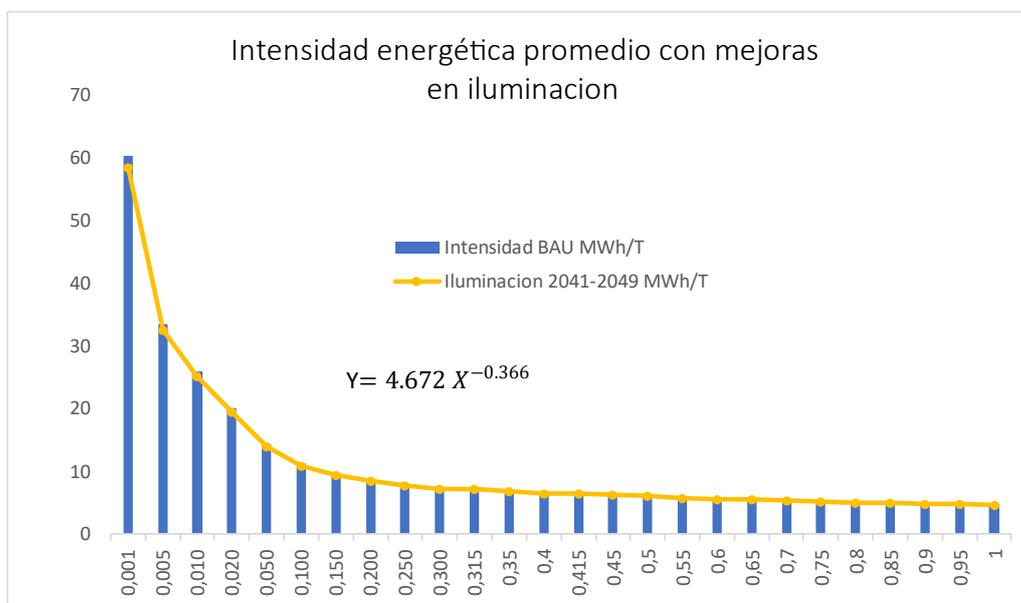
6.3.5.3.1. Iluminación

La incorporación o reemplazo de luminarias tipo fluorescente o neón por luminarias tipo LED y su medición de consumo de energía en la línea de tiempo han sido analizadas con la madurez de la tecnológica y la rentabilidad energética. Con la sustitución de luminarias con balastos por luminarias LED se puede conseguir un importante ahorro de energía si la cantidad de luminarias es significativa y, además de tener muchas horas de trabajo, la disminución de energía consumida será significativa. En la tabla, se puede visualizar la tasa de penetración esperada en el tiempo. Seguro que los porcentajes de penetración en cada rango de tiempo podrá ser debatible; pero, a largo plazo, el objetivo de la implementación será cumplido.

Tabla 57. Reducción del índice de intensidad por energía adoptada (iluminación)

Índice de intensidad energética	Disminución promedio		
	2021-2030	2031-2040	2041-2049
Iluminación (MWh)	1,81	3,13	2,98

Ilustración 34. Reducción de la intensidad energética con mejoras en iluminación (elaboración propia)



6.3.5.3.2. Alta eficiencia de motores eléctricos

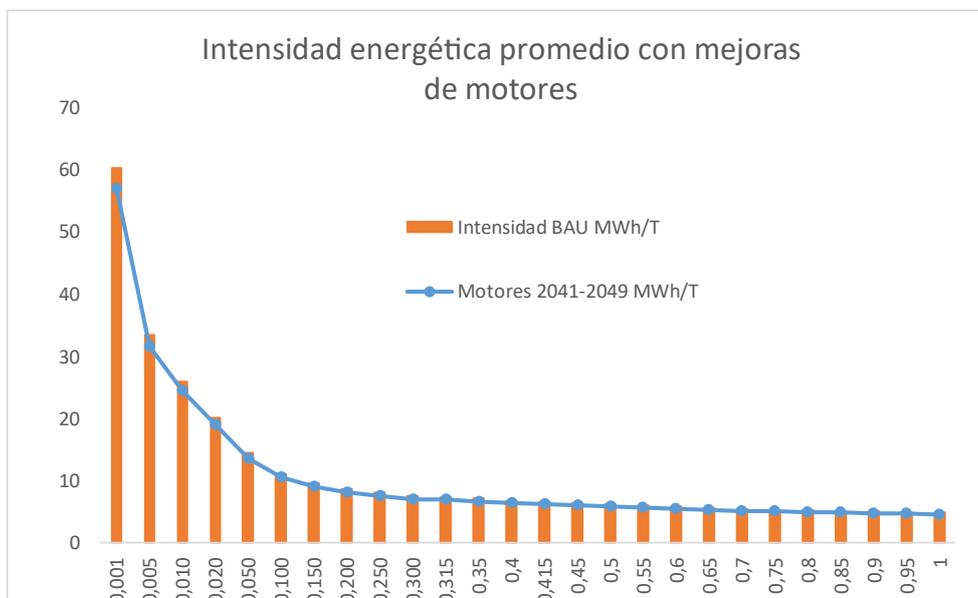
Se realiza una recomendación del potencial de ahorro de energía y las mejores prácticas sobre la eficiencia de motores operados en las plantas mineras. Mientras más años pasen, el rendimiento de los motores disminuye, por lo que es necesario el reemplazo por equipos o maquinarias de alta eficiencia que permitan un ahorro de energía importante.

La tasa de penetración desde un comienzo tendría que ser alta y, con el transcurso de los años, a largo plazo, los objetivos potenciales se tendrán que cumplir. La incorporación de estas tecnologías será irrenunciable, dada la buena rentabilidad en motores a partir de potencias medias, cuyo uso de horas continuas de operación sea alto.

Tabla 58. Reducción del índice de intensidad por energía adoptada (motores eficientes)

Índice de intensidad energética	Disminución promedio		
	2021-2030	2031-2040	2041-2049
Motores (MWh)	1,51	4,08	5,71

Ilustración 35. Reducción de la intensidad energética con motores eficientes (elaboración propia)



6.3.5.3.3. Implementación en equipos de chancado y molienda

El mayor incentivo de la minería para establecer cambios tecnológicos en la etapa de conminución son los incrementos sostenidos de energía y las caídas de la ley de los minerales. Las variaciones desfavorables de estas variables hacen que el sector de la minería invierta capital y busque soluciones de alta eficiencia energética. Por ejemplo, el empleo de equipos de prechancado y la promoción del empleo de rodillos de alta presión HPGR, en vez de la molienda SAG.

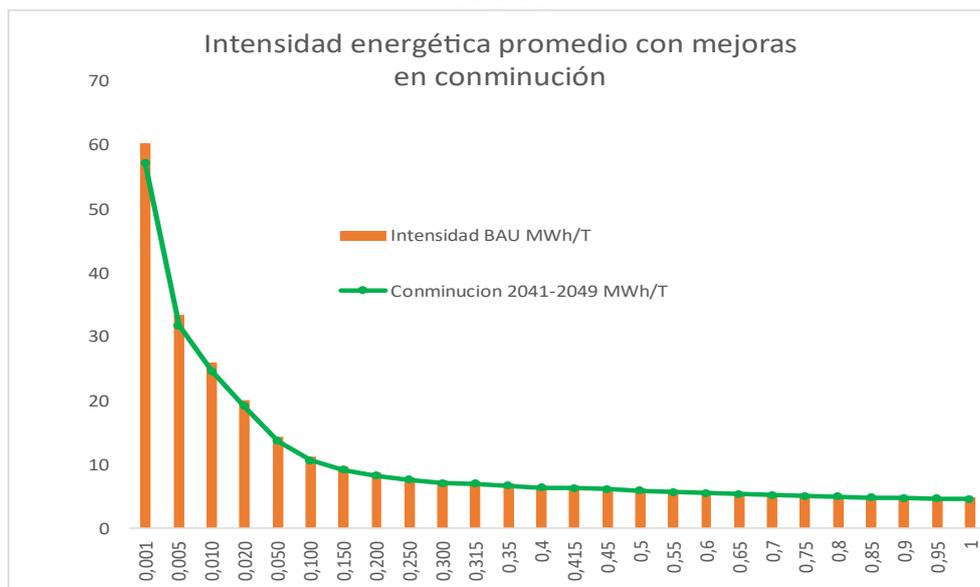
La inclusión y aplicación de tecnologías digitales en los procedimientos mineros es una nueva ventana para el ahorro de energía, a sabiendas de que la intensidad energética en la producción del concentrado de cobre va aumentando cada año a un promedio de 2,21 %, pese a que los procesos muestran un elevado potencial de ahorro de energía. Por tanto, tecnologías innovadoras como *data science*, simulación de escenarios, desarrollo de modelamiento de información, modelamientos predictivos y otros, serán los que dosificarán los gastos energéticos de cada proceso de valor. Cabe mencionar que la eficiencia energética depende del consumo consciente e inteligente; por ende, la digitalización de los procesos mineros del área del concentrado del mineral cobre será implementada integralmente con tecnologías innovadoras.

La tasa de penetración de las tecnologías en la innovación se establecerá, de forma optimista, durante los años iniciales de la implementación del programa para que en los siguientes periodos se pueda cumplir con los objetivos.

Tabla 59. Reducción del índice de intensidad por tecnología adoptada (conminución)

Índice de intensidad energética	Disminución promedio		
	2021-2030	2031-2040	2041-2049
	%	%	%
Conminución (MWh)	1,35	3,64	5,10

Ilustración 36. Reducción de la intensidad energética con mejoras tecnológicas en conminución (elaboración propia)



Al final del capítulo, se reportan las curvas exponenciales denominadas 1) reducción de la intensidad energética y 2) reducción de la intensidad de emisiones. Ambas están cuantificadas con respecto a cada escenario y describen la caída de la curva referencial, denominada curva BAU, causada por la penetración de programas de eficiencia energética.

Conclusiones

1. El consumo final del sector de la minería y la metalurgia es de 79 758 TJ de energía. El consumo de energía térmica en este sector representa cerca del 27,33 % del total, mientras que la energía eléctrica constituye el 72,7 %. Es fundamental identificar el consumo de energía eléctrica en la producción de cobre, especialmente, en sectores como la molienda y el chancado, los cuales representan alrededor del 55 % del consumo eléctrico total de la planta.

2. En general, el proceso de implementación de programas de eficiencia energética (EE) en el sector minero se llevó a cabo por etapas. Los países mineros latinoamericanos identificaron los beneficios relevantes de incorporar la planificación e implementación de EE, con los propósitos siguientes:

- Reducir los costos operativos en la cadena de producción.
- Mejorar la utilización de los recursos energéticos disponibles, buscando la sostenibilidad.
- Desacelerar las nuevas inversiones en fuentes de energía convencionales.
- Reducir el impacto ambiental.

La incorporación de medidas legales y políticas gubernamentales con metas de desarrollo y crecimiento, adaptadas a la realidad de cada país, permitió valorar estos propósitos.

3. Para hacer frente a los desafíos y barreras, una alternativa viable sería la implementación de programas de eficiencia energética en el sector minero, cuyo impacto afectaría la visión prospectiva de la energía en Perú hasta 2049. Esto debe ser considerado en marco de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) que, en su visión a largo plazo, identifica y respalda a los países en su búsqueda de un desarrollo sostenible, inclusivo y con conciencia ecológica. Esto implica la implementación de políticas públicas, presentación y análisis del presupuesto, y el seguimiento y la evaluación de las emisiones de gases generadas por las acciones y las actividades del ser humano.

Bajo esta perspectiva, la industria minera local tiene una oportunidad sin precedentes para integrarse en estos objetivos y movilizar recursos humanos, nuevas tecnologías y financiamiento para avanzar hacia un uso eficiente de la energía y la reducción de las emisiones de CO₂ (el acumulado de 19 958 332 tCO₂eq que representa el 17,78 % en la reducción de la emisión de gases al año 2049 en un escenario con la implementación de nuevas tecnologías por etapas).

Por tanto, la industria minera tiene un rol trascendental en el desarrollo y progreso de la tecnología nacional, en la producción de insumos esenciales para la

construcción, la energía, la agricultura y otros. Por consiguiente, la participación del sector minero resulta de suma importancia para avanzar en los objetivos de desarrollo sostenible.

4. En el Perú, algunas empresas mineras como Cerro Verde y Antamina han tomado la iniciativa de implementar programas internos para reducir el consumo energético en sus procesos mineros. Estos programas incluyen la medición, monitoreo y seguimiento de las emisiones directas de CO₂ relacionadas con las actividades mineras. Además, otras empresas mineras como Quellaveco y Toquepala están renovando o reemplazando equipos y herramientas de alto consumo energético por nuevas tecnologías más eficientes, con el objetivo de optimizar sus procesos y fomentar el uso conveniente de la energía. Estas acciones no solo generan ahorros económicos significativos en la factura de energía, sino que también tienen efectos positivos en el medio ambiente, como la mengua de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

La demanda de los metales críticos en la transición de tecnologías de energías limpias en las próximas décadas será demandante. La demanda global del cobre en dos décadas habrá crecido el 40 % (IEA), tomando en cuenta que el año 2021 la producción del concentrado de cobre fue de aproximadamente 25,3 millones de TMF. En el periodo proyectado al 2040, el Perú aportaría cerca de 3,5 millones TMF de cobre, el cual representaría el 9,90 % de la producción mundial. El Perú, como país potencial de reservas de este recurso, puede hacer sostenible el suministro a largo plazo, pero se requiere tomar medidas importantes como la implementación de programas de eficiencia energética y la aplicación de tecnologías innovadoras que reduzcan el indicador energético de la intensidad en la energía eléctrica. Cuando la transición energética se acelera, el equilibrio entre la oferta y la demanda se rompe, por lo que se requiere de reglas claras y seguras para alentar la inversión de los proyectos a largo plazo.

5. Para calcular el consumo de la energía proyectada, la ley del mineral del cobre cumple un rol valioso en el consumo de la energía. Desde que la minería metálica comenzó a explotar el cobre, las reservas y la calidad en la veta del mineral fue disminuyendo; por tanto, la intensidad energética para la producción de la concentración del cobre aumentaría significativamente. Para nuestro análisis, este importante indicador energético que interviene como un valor que cuantifica la energía consumida por unidad de volumen en peso se representa mediante una función potencial negativa $Y = 4.816 * X^{-0.366}$. Por esta razón, la ley del mineral del cobre tiene un lugar imprescindible en el análisis del consumo de la intensidad energética. Bajo el esquema de la

variabilidad de la ley del mineral se presentan diferentes escenarios de diferentes índices de intensidad que involucran soluciones diversas.

6. En el análisis de la curva potencial de la intensidad energética no se incorporó la influencia de las energías renovables. Dado que la mayor parte de la matriz energética en el Perú es hídrica y que la incorporación adicional de fuentes renovables, con una proyección máxima del 30 % al año 2049, podría tener solo un impacto menor en la curva potencial de la intensidad energética. Es posible que el coeficiente de la función no se vea afectado significativamente, ya que la dependencia de fuentes no renovables, como el gas natural, es relativamente baja. En ese caso, es más probable que la influencia de las fuentes renovables se refleje en una mayor estabilidad y sostenibilidad de la matriz energética en general —en la disminución de CO₂eq— en lugar de tener un impacto directo en el vínculo entre la ley del mineral y la intensidad energética representada por la curva potencial ($Y = 0.727 * X^{-0.366}$).



Recomendaciones

1. Es importante cuantificar las etapas en la producción del concentrado del cobre mediante dispositivos de medición de parámetros eléctricos que monitoreen de forma continua. Esto con el fin de almacenar datos para poder establecer prioridades en la adopción de medidas de eficiencia energética.

2. Dentro del sector minero existen programas específicos en los que las mineras, por cuenta propia, ejecutan programas de mitigación de emisiones. El Estado debería desarrollar un programa nacional de mitigación en el sector minero con la implementación de MVR.

3. El Estado peruano elaboró el programa de Huella de Carbono, en el que se reconoce el esfuerzo de mitigación de emisiones de los sectores estatales y privados con una certificación por logros en la reducción de emisiones. Sería recomendable implementar programas de ahorro energético para el sector minero en los que sus esfuerzos sean reconocidos.

4. En el periodo 2021-2049, implementar de manera integral programas de gestión eficiente de la energía y de nuevas tecnologías será la clave fundamental para mejorar o disminuir la intensidad energética en el proceso del concentrado de los minerales.

5. Implementar la transición de la matriz energética de las fuentes primarias del sistema eléctrico interconectado por RER será fundamental para la mitigación de los gases de CO₂ hacia el 2049.

6. Combinar la eficiencia energética y la transición de fuentes renovables será perfecto para la sustentabilidad en la producción de los minerales críticos.

7. Implementar una plataforma virtual para el sector de la gran minería metálica sería una herramienta valiosa. Esta plataforma tendría como objetivo registrar una extensa base de datos de proyectos y de la implementación tecnológica de los procesos de valor agregado en el sector minero metálico. Además, permitiría unificar datos históricos sobre la evolución del agotamiento de los minerales como el cobre en diferentes centros mineros.

Esta plataforma proporcionaría una fuente centralizada de información que sería beneficiosa para la industria minera y otros actores interesados. Además, la recolección y el análisis de datos históricos acerca de la disminución de la ley de los minerales sería valiosa para comprender la evolución de los yacimientos y las implicaciones para la producción futura.

Bibliografía

- Antofagasta Minerals, (2019.) Reporte del avance de convenio de cooperación entre Ministerio de Energía y Consejo Minero. https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_AMSA2019.pdf.
- Autoridad Nacional del Agua [ANA]. (2013). Plan nacional de recursos hídricos del Perú. <https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/plannacionalrecursoshidricos2013.pdf>
- Autoridad Nacional del Agua [ANA]. (2014). Agua y energía para el desarrollo sostenible del país. <https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/2116/ANA0000935.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Báez, M.; Briano, J. & Moya, R. (2016). *Eficiencia energética en Chile. Identificación de oportunidades*. <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/944>.
- BrainWave. 2015. Soluciones de control para molinos SAG. <https://www.andritz.com/resource/blob/14842/ae5be95c7e2ada6ac18826845ef73f46/aa-brainwave-sag-mill-es-data.pdf>.
- Calvo, G; Mudd, G.; Valero, A. & Valero, A. (2016). Decreasing Ore Grades in Global Metallic Mining: A Theoretical Issue or a Global Reality. *Resources*. 5(4). <https://doi.org/10.3390/resources5040036>.
- Centro de estudios del cobre y la minería [Cesco]. (2020). *Hacia una minería 4.0. Recomendaciones para impulsar una industria nacional inteligente*. <https://www.cesco.cl/wp-content/uploads/2020/06/Hacia-una-miner%C3%ADa-4.0.-Recomendaciones-para-impulsar-una-industria-nacional-inteligente-1-2.pdf>.
- Codelco. (2020). Reporte avance del convenio de cooperación entre ministerio de energía y consejo minero. https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/08/reporte_EE_Codelco2019.pdf.
- Cochilco, (2020). Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2019. <https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Informe%20de%20Consumo%20de%20Energ%C3%ADa%202019.pdf>.
- Cochilco, (2020). Emisiones de gases de efecto invernadero directos e indirectos en la minería del cobre al año 2019. <https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Informe%20GEI%20Directos%20e%20Indirectos%20202019%20Final%20con%20RPI.pdf>.
- Commodity Summaries (2020) U. S. Geological Survey (USGS). <https://miningpress.com/pdfjs/web/viewer.html?file=/public/archivos/FyXmBpsAf2wffw11Fbrqo7Upi7clmwIzfvXIEvG.pdf>.

- Cooperación (2020). Actualidad minera. *Boletín electrónico*. Dic, pp. 3-7. www.cooperacion.org.pe
- Cooperación alemana al desarrollo [GIZ] & Samienergy, (2021). Análisis del potencial y eventuales actuales usos que tienen las fuentes alternativas en la minería peruana. <https://minsus.net/mineria-sustentable/wp-content/uploads/2021/02/Energias-renovables-en-la-mineria-del-Peru.pdf>.
- Creara Energy Experts. (2016), Barreras en la eficiencia energética en el Perú. Informe final.
- ENGIE Impact, (2021). *Potencial del hidrógeno verde en el Perú* [Diapositivas de Power Point]. H₂ Perú. Asociación peruana de hidrógeno. https://h2.pe/uploads/20210908_H2-Peru_Estudio-final.pdf
- IEA, (2021a). Mineral Requirements for Clean Energy Transitions. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf>
- IEA, (2021b). Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector. https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf.
- IEA, (2021c). The Role of Critical Report Minerals in Clean Energy Transitions. World Energy Outlook Special Report. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf>.
- Instituto Nacional de Estadística en Informática [INEI], (2020). Informe Técnico. Producción nacional. Noviembre 2020. <https://m.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/11-informe-tecnico-produccion-nacional-set-2020.pdf>.
- Irena, (2014). *Manual sobre acciones de mitigación nacionalmente apropiadas (NAMA) en el sector de energías renovables* (2ª edición). https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2014/IRENA_NAMAs_handbook_2014_ES.PDF?la=en&hash=2A4612E64A2247912426B7D0163302AE22098F96.
- MEM, (2014). Agenda de energía. Un desafío país, progreso para todos. https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/agenda_de_energia_-_resumen_en_espanol.pdf.
- Minam, (2018). Grupo de trabajo multisectorial de naturaleza temporal encargado de generar información técnica para orientar la implementación de las contribuciones nacionalmente determinadas (GTM-NDC). Informe Final. https://www.minam.gob.pe/cambioclimatico/wp-content/uploads/sites/127/2019/01/190107_Informe-final-GTM-NDC_v17dic18.pdfPA%C3%91OL.pdf.

- Minam, (2020). Contribución peruana a la consecución del objetivo de la Convención Reporte de actualización periodo 2021-2030. <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/Reporte%20de%20Actualizacio%CC%81n%20de%20las%20NDC%20del%20Peru%CC%81.pdf>.
- Minem, (2016). Atlas eólico del Perú. <https://www.minem.gob.pe/publicacion.php?idSector=6&idPublicacion=537>.
- Minem, (2017). Guía de orientación del uso eficiente de la energía y de diagnóstico energético. Minería metálica. Dirección General de Eficiencia Energética. <https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGEE/eficiencia%20energetica/publicaciones/guias/1%20quia%20minería%20metalica%20DGEE-1.pdf>.
- Minem, (2019). Anuario Minero 2019. <https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/PUBLICACIONES/ANUARIOS/2019/AM2019.pdf>.
- Minem, (2019). Informe de empleo minero 2019. Panorama y tendencias en el Perú. <https://minem.gob.pe/download.php?idTitular=9618>.
- Minem, (2020). Minería peruana motor de crecimiento en un contexto de crisis. Comité de gestión minero energético como plataforma de acción y diálogo. <https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/PUBLICACIONES/VARIABLES/2020/BEMdic2020.pdf>.
- Minem, (2021). Balance positivo del sector. En 2021, la inversión minera supero los US\$ 5 200 millones. *Boletín estadístico minero*. (12), p. 4-33. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2802527/BEM%20%2012-2021.pdf.pdf?v=1644589735>.
- Minem, (2022). Boletín estadístico minero. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4097457/BEM%2012-2022.pdf?v=1675805688>.
- Ministerio de la producción, (2017). Uso de energías renovables en la acuicultura. *Boletín de vigilancia tecnológica*. (2), pp. 4-30. https://www.itp.gob.pe/archivos/vtic/ACUICULTURA_002-2017.pdf.
- Ministerio de Minas y Energía [MME], (2019). Informe de impacto. Programa EEI Colombia. https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/EEIColombia/Impacto_proyecto_EEI.pdf
- Ministerio de Minas y Energía [MME], (2016). Plan de acción indicativo de eficiencia energética 2017-2022. Una realidad y oportunidad para Colombia. http://www.upme.gov.co/SeccionDemanda/Normatividad/PAI_PROURE_2017-2022.pdf.
- Ministerio de Minas y Energía [MME], (2020). Transición energética de Colombia. Memorias al congreso. La nueva energía.

https://www.minenergia.gov.co/documents/5744/Memorias_al_Congreso_2019-2020.pdf

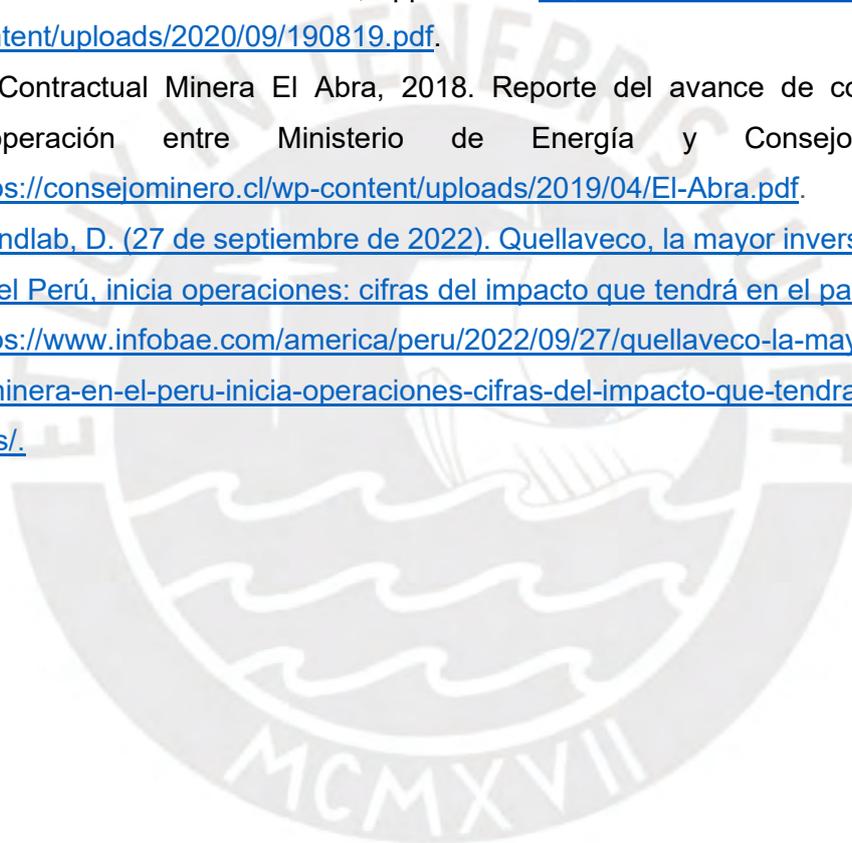
Osinermin, (2019). Reporte de análisis económico sectorial de minería. Relación actual y futura entre sector minero y sector eléctrico. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1400563/RAES-Miner%C3%ADa-A%C3%B1o%208-N%C2%BA%2012.pdf>.

Osinermin, (2020). Reporte Semestral de Monitoreo del Mercado de Productos Mineros. GPAE. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1400553/RSMM-M-A%C3%B1o%209-N%C2%BA%2016%3A%202020-I.pdf>.

Peñaranda, C. (19 de agosto de 2019). La minería y su aporte económico al Perú. *La cámara. Informe económico*, pp. 6-8. <https://www.camaralima.org.pe/wp-content/uploads/2020/09/190819.pdf>.

Sociedad Contractual Minera El Abra, 2018. Reporte del avance de convenio de cooperación entre Ministerio de Energía y Consejo Minero. <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/04/El-Abra.pdf>.

Wandlab, D. (27 de septiembre de 2022). Quellaveco, la mayor inversión minera en el Perú, inicia operaciones: cifras del impacto que tendrá en el país. *Infobae*. <https://www.infobae.com/america/peru/2022/09/27/quellaveco-la-mayor-inversion-minera-en-el-peru-inicia-operaciones-cifras-del-impacto-que-tendra-en-el-pais/>.



Catálogo de sitios web

- Plataforma de revista internacional especializada en minería y energía.
<https://mineriaenergia.com/energia/>.
- Plataforma de revista internacional de negocios especializada en minería y energía.
<https://www.rumbominero.com/>.
- Plataforma informativo sobre el plano empresarial del Perú y del mundo.
<https://gestion.pe/economia/>.
- Plataforma global de noticias sobre el desarrollo de tecnologías emergentes.
<https://www.pv-magazine-latam.com/>.
- Plataforma informativa del ministerio de energía y minas del Perú.
<https://www.gob.pe/minem#publicaciones>.
- Plataforma de la agencia internacional de energía sobre fuentes de datos energéticos globales.
<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-products/?filter=efficiency>.
- Plataforma de compendios de ingeniería de procesos de conminación para algunas aplicaciones mecánicas en la minería.
<https://www.modelooperacional.com.br/es/2021/05/31/esg-del-marketing-a-la-accion/>.
- Plataforma de consultoría internacional de la industria minera.
<https://www.micon-international.com/es/>.
- Plataforma de inventario nacional de gases de efecto invernadero.
<https://infocarbono.minam.gob.pe/inventarios-nacionales-gei/intro/>.
- Plataforma de revista especializada en minería, energía e hidrocarburos.
<http://ecomingrupo.com/category/energia/>.
- Plataforma de programas de energías renovables y eficiencia energética en Chile.
<https://www.4echile.cl/proyectos/ee-mineria/>.
- Plataforma de herramienta oficial del MINAM de la huella de carbono.
<https://huellacarbonoperu.minam.gob.pe/huellaperu/#/inicio>.
- Plataforma grupo Enel Perú de innovación y sostenibilidad.
<https://www.enel.pe/es/sostenibilidad.html>.
- Plataforma de revista nacional especializada en temas de minería y energía.
<https://energiminas.com/category/mineria/>.
- Plataforma de blog del BID para conversar sobre innovación en América Latina.
<https://blogs.iadb.org/innovacion/es/>.
- Plataforma sobre compendio de proyectos hidroeléctricos subasta RER.
https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/electricidad/Documentos/Publicaciones/Compendio-Proyectos-GTE-Operacion-enero-2018.pdf.

Plataforma sobre compendio de proyectos centrales solares en operación.
https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/electricidad/Documentos/PROYECTOS%20GFE/Acorde%C3%B3n/Generaci%C3%B3n/1.6.6.pdf.

Plataforma sobre compendio de proyectos eólicos en operación.
https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/electricidad/Documentos/PROYECTOS%20GFE/Acorde%C3%B3n/Generaci%C3%B3n/1.7.5.pdf.

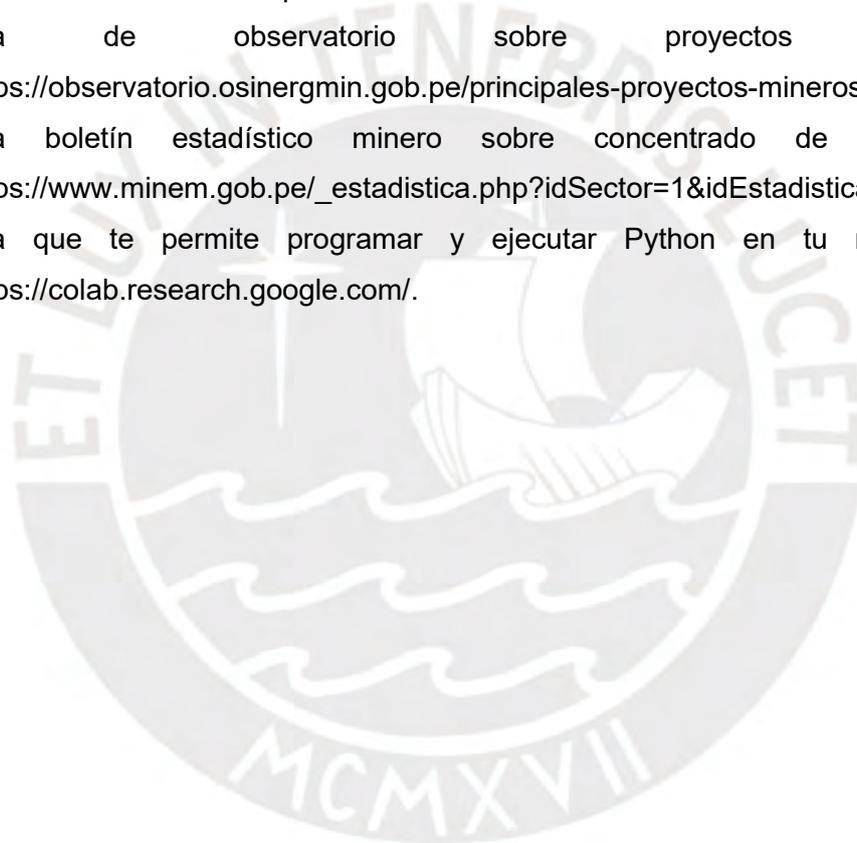
Plataforma de la agencia internacional de energía sobre minerales críticos.
<https://www.iea.org/search?q=critical%20minerals%20in%20the%20clean%20energy>.

Plataforma informativa minera Quellaveco. <https://peru.angloamerican.com/es-es/medios/un-vistazo-a-quellaveco>.

Plataforma de observatorio sobre proyectos mineros.
<https://observatorio.osinergmin.gob.pe/principales-proyectos-mineros>.

Plataforma boletín estadístico minero sobre concentrado de minerales.
https://www.minem.gob.pe/_estadistica.php?idSector=1&idEstadistica=12501.

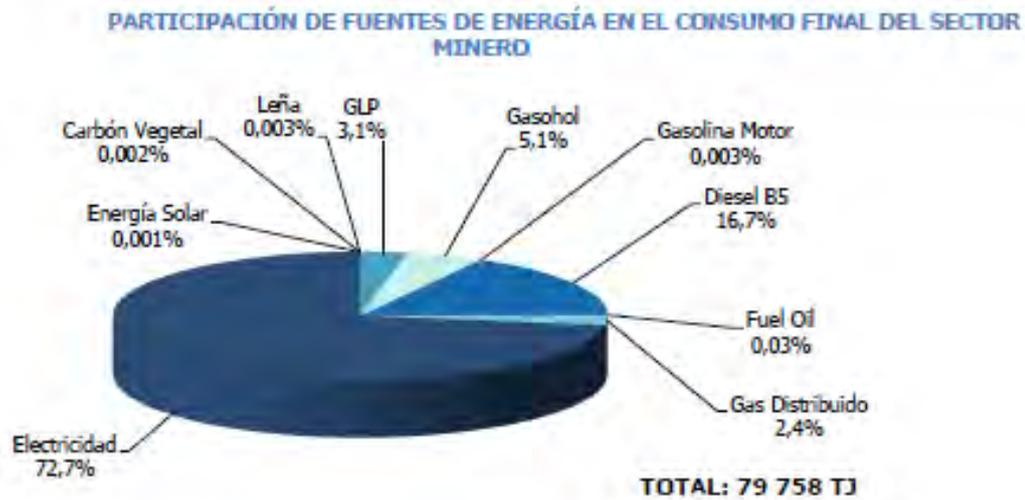
Plataforma que te permite programar y ejecutar Python en tu navegador.
<https://colab.research.google.com/>.



Anexos

Anexo 1. Estimación del consumo de energía neta de electricidad del sector minero y la emisión de CO₂, año 2019.

Cálculo propio, basado en datos de la tesis



Demanda de energía eléctrica por zonas mineras

Zona Minera	Metales extraídos	Año	Demanda Energía eléctrica GWh (72,7 %)	Demanda Energía eléctrica TJ (72,7 %)
Norte	Au, Ag	2019	810	2 916
Centro	Polimetálico	2019	3 717	13 381
Sur	Cu, Mb	2019	8 826	31 774
Otros			2 677	9 913
Total				57 984

Fuente: Extraído datos de tesis, capítulo «Análisis por zonas del consumo eléctrico de las mineras» (p. 40).

Emisión de CO₂eq por zonas de las empresas mineras, 2019 indirecto

Energía Eléctrica

Zona minera	Metales extraídos	Año	Consumo electricidad TJ	FE tCO ₂ eq/MWh	GEI emitido (usuario) tCO ₂ eq	GEI emitido (pérdidas) tCO ₂ eq	GEI emitido (totales) tCO ₂ eq
Norte	Au, Ag	2019	2 916	0,151	109 345	12 965	122 310
Centro	Polimetálico	2019	13 381	0,151	501 773	59 494	561 267
Sur	Cu, Mb	2019	31 774	0,151	1 191 457	141 269	1 332 726
Otros			9 913	0,151	404 153	40 415	444 568
Total			57 984				2 460 871

Anexo 2. Código en programa Python del modelo de regresión de la producción en la proyección del cobre.

El objetivo es el siguiente: hallar la curva más representativa del análisis de datos históricos de las variables independientes y su correlación con la variable dependiente, que será la función que represente la dupla (x, y) para la predicción futura al año 2021-2049 en la producción del concentrado de cobre.

A partir de los valores históricos de la producción del cobre, hallaremos la curva de ajuste de la variable dependiente para calcular los valores futuros de la función

Teniendo como datos históricos los años del 2001-2020 (producción metálica Cu 2001-2020.xlsx)

Año	Producción de concentrado de Cu
2001	722 355
2002	844 553
2003	842 605
2004	1 035 574
2005	1 009 899
2006	1 048 472
2007	1 190 274
2008	1 267 867
2009	1 276 249
2010	1 247 184
2011	1 235 345
2012	1 298 761
2013	1 375 641
2014	1 377 642
2015	1 700 817
2016	2 353 859
2017	2 445 585
2018	2 436 951
2019	2 455 440
2020	2 153 952

El algoritmo es el siguiente:

1. Se definen las características de la curva más representativa, teniendo en cuenta la tasa de crecimiento de sus coordenadas. Es una función potencial ($Y = kX^n$)
2. Se realiza la regresión potencial para ajustar la curva a los datos dispersos, de lo que se obtienen los parámetros (n, k) de la función.
3. Una vez calculados los parámetros (n, k) de la función potencial, se imprimen los valores de la variable dependiente proyectados a los años 2021-2049. En seguida, se grafica la función de la curva predictiva.

El código en Python es el siguiente:

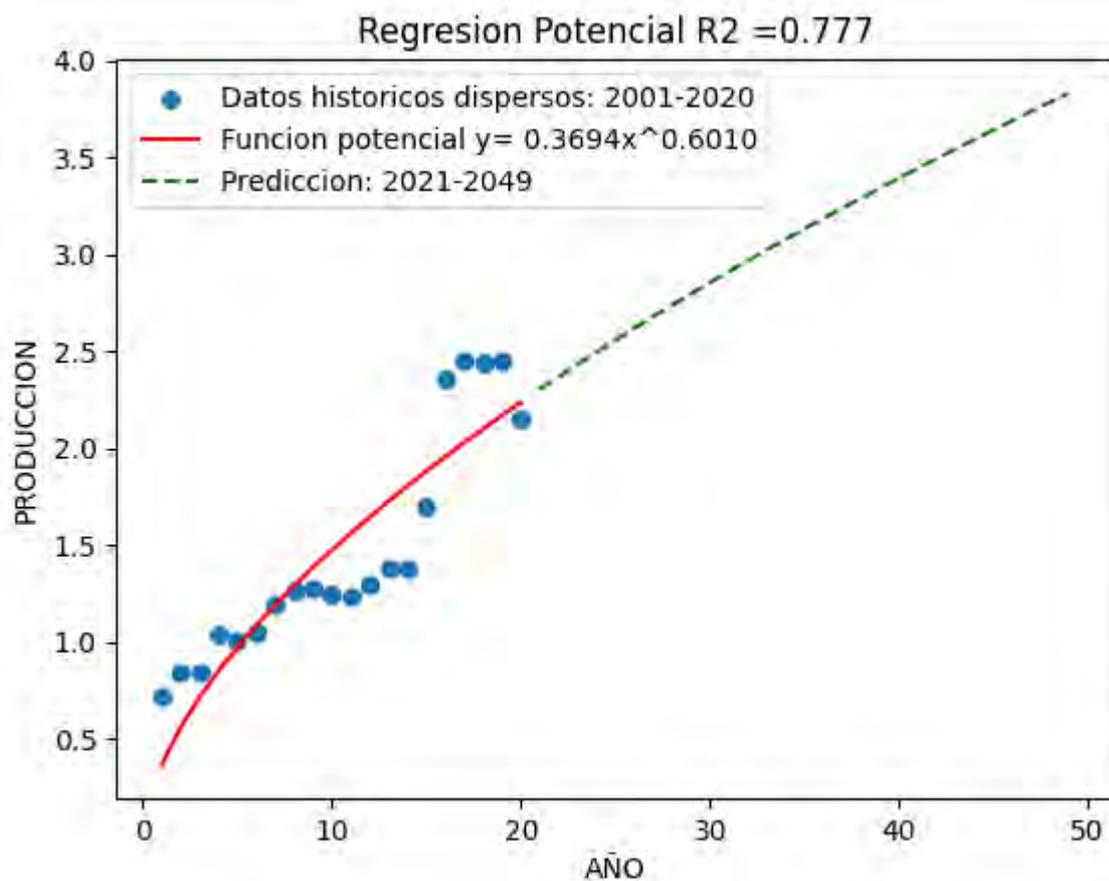
```
# Cálculo de la regresión potencial con la función curve_fit
import pandas as pd
import numpy as np
from scipy.optimize import curve_fit
from sklearn.metrics import r2_score
import matplotlib.pyplot as plt

# Importar Data Frame \producción metálica Cu 2001-2020.xlsx
df = pd.read_excel("\producción metálica Cu 2001-2020.xlsx')
x = df['AÑO']
y = df['PRODUCCION']/1000000
# define la función potencial de la curva de ajuste
def data_regresion(x,a,b):
    return a * np.power(x, b)
# Calculo de la curva de regresión potencial con la función curve_fit
mta, mtb = curve_fit(data_regresion, x, y)
a, b = mta
# Calculo del coeficiente de determinación R2
y_pred = a*x**b
r2 = r2_score(y, y_pred)
# Predicción de los valores de salida con la entrada de datos futuros
predict_x = [21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,
40,41,42,43,44,45,46,47,48,49]
predict_y = data_regresion(predict_x, a, b)
# Impresión de la dupla de valores futuros
print("Dupla de datos proyectados del 2021-2049")
for var1, var2 in zip(predict_x, predict_y):
    print(f"x = {var1}, y = {var2}")
x_regresion = np.linspace(x.min(), x.max(), 20)
```

```

y_regresion = y_pred
plt.scatter(x, y, label = 'Datos historicos dispersos: 2001-2020')
plt.plot(x_regresion, y_regresion, 'r-', label = 'Funcion potencial y=
'+str(a)[:6]+'x'+'^'+str(b)[:6])
plt.plot(predict_x, predict_y, color = 'green', linestyle = '--', label = 'Prediccion:
2021-2049')
plt.xlabel('AÑO')
plt.ylabel('PRODUCCION')
plt.title( 'Regresion Potencial '+ 'R2 =' + str(r2)[:5])
plt.legend(numpoints=1)
plt.show()

```



Curva de ajuste: $Y = 0,3694 * X^{0,6010}$

Análisis propio		Análisis de regresión	
Año	Proyección diseño de producción de Cu TM	Valores predichos de producción de Cu TM	Δ
2021	2 326 035	2 302 240,49	0,01022965
2022	2 396 254,92	2 367 516	0,01199327
2023	2 688 325,92	2 431 617,84	0,09548994
2024	2 697 103,41	2 494 616,83	0,07507557
2025	2 712 464,02	2 556 576,76	0,05747072
2026	2 733 968,87	2 617 555,35	0,04258041
2027	2 832 101,22	2 677 605,02	0,05455179
2028	2 946 208,60	2 736 773,58	0,07108628
2029	3 055 927,23	2 795 104,75	0,0853497
2030	3 061 413,16	2 852 638,67	0,06819546
2031	3 131 633,08	2 909 412,29	0,07096004
2032	3 194 699,35	2 965 459,71	0,07175625
2033	3 251 314,17	3 020 812,49	0,07089492
2034	3 361 032,80	3 075 499,92	0,08495391
2035	3 386 926,40	3 129 549,22	0,07599137
2036	3 397 898,26	3 182 985,75	0,06324866
2037	3 465 046,06	3 235 583,2	0,06615002
2038	3 465 046,06	3 288 113,75	0,05106204
2039	3 491 378,54	3 339 848,14	0,04340131
2040	3 491 378,54	3 391 055,88	0,0287344
2041	3 644 984,62	3 441 755,29	0,05575588
2042	3 644 984,62	3 491 963,65	0,04198124
2043	3 726 615,28	3 541 697,24	0,04962091
2044	3 726 615,28	3 590 971,43	0,03639867
2045	3 946 052,55	3 639 800,76	0,07760966
2046	3 946 052,55	3 688 199,02	0,06534468
2047	3 974 798,83	3 736 179,25	0,06003312
2048	3 974 798,83	3 783 753,84	0,04806406
2049	4 003 545,11	3 830 934,58	0,04311442
			Σ = 1,6770

$$\Delta_{promedio} = \frac{167.70}{29} = 5,78\%$$

Promedio se refiere al promedio de la diferencia porcentual de ambos análisis.

Anexo 3. Cálculo de ahorro de energía y reducción de emisiones, con la implementación del sistema de gestión de eficiencia energética (SGE)

Energía.

Implementación	Consumo eléctrico %	Índice de ahorro %
SGE	100	25

SGE	2021-2030 %	2031-2040 %	2041-2049 %
Potencial objetivo	40	75	100

Periodos	Consumo eléctrico %	Índice de ahorro %	Potencial objetivo %	Ahorros objetivos %
2021-2030	100	25	40	10
2021-2040	100	25	75	18,75
2021-2049	100	25	100	25

*El índice de ahorro o tasa de rendimiento del 25%, se aplicara para el periodo de análisis 2021 – 2049.

Los ahorros objetivos son calculados e influenciados por los demás parámetros de la tabla. Se hace notar que el objetivo de los 10 primeros años será del 10 % de ahorro de energía y, con esto, los siguientes objetivos de crecimiento de ahorro energético de los periodos establecidos serán calculados.

$$2021-2030: 1 \cdot 0,25 \cdot 0,40 = 0,10$$

$$2021-2040: 1 \cdot 0,25 \cdot 0,75 = 0,1875$$

$$2021-2049: 1 \cdot 0,25 \cdot 1 = 0,25$$

Se reemplazan valores de los diferentes periodos:

1. El consumo de energía BAU de los 10 primeros años será igual a 208 151 189 MWh, por lo que el ahorro objetivo será 20 815 119 MWh (10 %). La distribución de los ahorros de energía durante este periodo se hará proporcionalmente a los años transcurridos del uno al diez.

$$G_i = (0,10 \cdot H_1) / (n_1(n_1+1)/2) \cdot i$$

G_i: ahorro de energía en cada año

i: año calculado (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10)

H₁: consumo de energía BAU de los primeros 10 años

n₁: 10

2. El consumo de energía BAU de los años 2021-2040 será igual a 470 023 014 MWh y el objetivo ahorro será 88 129 315 MWh (18,75 %). La distribución de los ahorros de energía durante este periodo se hará proporcionalmente a los años transcurridos del once al veinte.

$$G_i = (0,1875 * H_2 - 0,10 * H_1) / (n_2(n_2+1)/2 - n_1(n_1+1)/2) * i$$

G_i : ahorro en cada año

i : año calculado (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20)

H_2 : consumo de energía BAU acumulada de 20 años

n_2 : 20

3. El consumo de energía BAU de los años 2021-2049 será igual a 744 060 486 MWh y el objetivo ahorro será 186 015 122 MWh (25 %). La distribución de los ahorros de energía durante este periodo se hará proporcionalmente a los años transcurridos del veintiuno al veintinueve.

$$G_i = ((0,25 * H_3 - 0,1875 * H_2) / (n_3(n_3+1)/2 - n_2(n_2+1)/2)) * i$$

i : año calculado (21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29)

H_3 : consumo de energía BAU acumulada de 29 años

n_3 : 29

Reducción de emisión de gases

Factor de emisión nacional asociado con el consumo de electricidad del SEIN

Año	FE tCO ₂ eq/MWh
2018	0,150

RER	2021-2030 %	2031-2040 %	2041-2049 %
Potencial objetivo	10	30	40

4. Ahorro de emisiones de CO₂ de los 10 primeros años. La distribución de los ahorros de energía durante este periodo se hará sumando los ahorros energéticos por año y la entrada de fuentes RER que están distribuidas proporcionalmente a los años transcurridos del uno al diez, ambos multiplicados por el factor de emisión.

$$Q_j = [G_j + (0,10 * H_1 / (n_1(n_1+1)/2))] * j * 0,151$$

Q_j : ahorro de emisiones por año

G_j : ahorro de energía por año

j: año calculado (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10)

H₁: consumo de energía BAU de los 10 primeros años

n₁: 10

5. Ahorro de emisiones de CO₂ de los años 2021-2040. La distribución de los ahorros de energía durante este periodo se hará sumando los ahorros energéticos por año y la entrada de fuentes RER que están distribuidas proporcionalmente a los años transcurridos del once al veinte, ambos multiplicados por el factor de emisión.

$$Q_j = [G_j + ((0,30 \cdot H_2 - 0,10 \cdot H_1) / (n_2(n_2+1)/2 - n_1(n_1+1/2))) \cdot j] \cdot 0,151$$

Q_j: ahorro de emisiones por año

G_j: ahorro de energía por año

j: año calculado (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20)

H₂: consumo de energía BAU acumulado de 20 años

n₂: 20

6. Ahorro de emisiones de CO₂ de los años 2021-2049. La distribución de los ahorros de energía durante este periodo se hará sumando los ahorros energéticos por año y la entrada de fuentes RER que están distribuidas proporcionalmente a los años transcurridos del veintiuno al veintinueve, ambos multiplicados por el factor de emisión.

$$Q_j = [G_j + (0,40 \cdot H_3 - 0,30 \cdot H_2) / (n_3(n_3+1)/2 - n_2(n_2+1/2))] \cdot j \cdot 0,151$$

Q_j: ahorro de emisiones por año

G_j: ahorro de energía por año

j: año calculado (21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29)

H₃: consumo de energía BAU acumulado de 29 años

n₃: 29

Anexo 4. Cálculo de ahorro de energía con la implementación de mejoras tecnológicas

Energía.

Implementación	Consumo eléctrico %	Índice de ahorro %
Mejora de motores	20	20
Digitalización (chancado, molienda)	55	6,5
Iluminación	5	55
Uso adecuado	20	45

Uso adecuado	2021-2030 %	2031-2040 %	2041-2049 %
Potencial objetivo	40	75	100

Mejora de motores	2021-2030 %	2031-2040 %	2041-2049 %
Potencial objetivo	40	75	100

Mejora en conminución	2021-2030 %	2031-2040 %	2041-2049 %
Potencial objetivo	40	75	100

Iluminación led	2021-2030 %	2031-2040 %	2041-2049 %
Potencial objetivo	70	95	100

Periodo	Implementación	Consumo eléctrico %	Índice de ahorro %	Potencial objetivo %	Ahorros Objetivos %
2021-2030	Uso adecuado	20	45	40	3,60
	Motores	20	20	40	1,60
	Conminución	55	65	40	1,43
	Iluminación	5	55	70	1,93
Acumulado					8,56

Uso adecuado: $0,20 \times 0,45 \times 0,40 = 0,036$

Motores: $0,20 \times 0,20 \times 0,40 = 0,16$

Conminución: $0,55 \times 0,65 \times 0,40 = 0,0143$

Iluminación: $0,05 \times 0,55 \times 0,70 = 0,0193$

Periodo	Implementación	Consumo eléctrico %	Índice de ahorro %	Potencial objetivo %	Ahorros Objetivos %
2021-2040	Uso adecuado	20	45	75	6,75
	Motores	20	20	75	3,00
	Conminución	55	65	75	2,68
	Iluminación	5	55	90	2,61
Acumulado					15,00

Uso adecuado: $0,20 \times 0,45 \times 0,75 = 0,0675$

Motores: $0,20 \times 0,20 \times 0,75 = 0,030$

Conminución: $0,55 \times 0,65 \times 0,75 = 0,0268$

Iluminación: $0,05 \times 0,55 \times 0,90 = 0,0261$

Periodo	Implementación	Consumo eléctrico %	Índice de ahorro %	Potencial objetivo %	Ahorros objetivos %
2021-2049	Uso adecuado	20	45	100	9,00
	Motores	20	20	100	4,00
	Conminución	55	65	100	3,58
	Iluminación	5	55	100	2,75
Acumulado					19,325

Uso adecuado: $0,20 \cdot 0,45 \cdot 1 = 0,09$

Motores: $0,20 \cdot 0,20 \cdot 1 = 0,04$

Conminución: $0,55 \cdot 0,65 \cdot 1 = 0,0358$

Iluminación: $0,05 \cdot 0,55 \cdot 1 = 0,0275$

Reemplazando valores de los diferentes periodos:

1. El consumo de energía BAU de los 10 primeros años será igual a 208 151 189 MWh, así, el acumulado del ahorro objetivo será 15 136 234 MWh (8,555 %). La distribución de los ahorros de energía durante este periodo se hará proporcionalmente a los años transcurridos del uno al diez.

Se aplica por cada tecnología implementada (uso adecuado, motores, conminución e iluminación), al final la suma de estas mejoras será el ahorro acumulado.

$$G_i = (AO_1 \cdot H_1 / (n_1(n_1+1)/2))^i$$

G_i : ahorro de energía en cada año

AO_1 : (0,036; 0,016; 0,0143; 0,0193)

i : año calculado (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10)

H_1 : consumo de energía BAU de los primeros 10 años

n_1 : 10

2. El consumo de energía BAU de los años 2021-2040 será igual a 470 023 014 MWh, así, el acumulado del ahorro objetivo será 62 747 812 MWh (15,04 %). La distribución de los ahorros de energía durante este periodo se hará proporcionalmente a los años transcurridos del once al veinte.

$$G_i = ((AO_2 \cdot H_2 - AO_1 \cdot H_1) / (n_2(n_2+1)/2 - n_1(n_1+1)/2))^i$$

G_i : ahorro en cada año

AO_2 : (0,0675; 0,030; 0,0268; 0,0261)

i : año calculado (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20)

H_2 : consumo de energía BAU acumulada de 20 años

n_2 : 20

3. El consumo de energía BAU de los años 2021-2049 será igual a 744 060 486 MWh, así, el acumulado del ahorro objetivo será 132 174 384 MWh (19,325 %). La distribución de los ahorros de energía durante este periodo se hará proporcionalmente a los años transcurridos del veintiuno al veintinueve.

$$G_i = ((AO_3 \cdot H_3 - AO_2 \cdot H_2) / (n_3(n_3+1)/2 - n_2(n_2+1)/2))^i$$

G_i : ahorro en cada año

AO_3 : (0,090; 0,040; 0,0358; 0,0275)

i : año calculado (21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29)

H_3 : consumo de energía BAU acumulada de veintinueve años

$$N_3 = 29$$

Reducción de la emisión de gases.

4. Ahorro de emisiones de CO₂ de los 10 primeros años. La distribución de los ahorros de energía durante este periodo se hará sumando los ahorros energéticos por año y la entrada de fuentes RER que están distribuidas proporcionalmente a los años transcurridos del uno al diez, ambos multiplicados por el factor de emisión.

$$Q_j = [G_j + (0,10 \cdot H_1 / (n_1(n_1+1)/2))^j] \cdot 0,151$$

Q_j: ahorro de emisiones por año

G_j: ahorro de energía por año

j: año calculado (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10)

H₁: consumo de energía BAU de los 10 primeros años

n₁: 10

5. Ahorro de emisiones de CO₂ de los años 2021-2040. La distribución de los ahorros de energía durante este periodo se hará sumando los ahorros energéticos por año y la entrada de fuentes RER que están distribuidas proporcionalmente a los años transcurridos del once al veinte, ambos multiplicados por el factor de emisión.

$$Q_j = [G_j + ((0,30 \cdot H_2 - 0,10 \cdot H_1) / (n_2(n_2+1)/2 - n_1(n_1+1)/2))^j] \cdot 0,151$$

Q_j: ahorro de emisiones por año

G_j: ahorro de energía por año

j: año calculado (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20)

H₂: consumo de energía BAU acumulado de 20 años

n₂: 20

6. Ahorro de emisiones de CO₂ de los años 2021-2049. La distribución de los ahorros de energía durante este periodo se hará sumando los ahorros energéticos por año y la entrada de fuentes RER que están distribuidas proporcionalmente a los años transcurridos del veintiuno al veintinueve, ambos multiplicados por el factor de emisión.

$$Q_j = [G_j + (0,40 \cdot H_3 - 0,30 \cdot H_2) / (n_3(n_3+1)/2 - n_2(n_2+1)/2))^j] \cdot 0,151$$

Q_j: ahorro de emisiones por año

G_j: ahorro de energía por año

j: año calculado (21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29)

H₃ = consumo de energía BAU acumulado de 29 años

n₃ = 29

Anexo 5. Cálculo para hallar el indicador de intensidad energética implementando SGE

Resultados calculados del índice de intensidad que modifica el indicador de intensidad energético con la aplicación del sistema de gestión de eficiencia energética.

Año	Producción Cu Futuro TMF	Consumo de energía BAU MWh	Ahorro SGE MWh	Total consumo de energía MWh	Intensidad promedio C/SGE MWh/TMF	Intensidad promedio BAU MWh/TMF	Índice de intensidad C/SGE
2021	2 326 035	15 811 500	378 457	15 433 043	6,635	6,798	0,024
2022	2 396 255	16 661 920	756 913	15 905 007	6,637	6,953	0,045
2023	2 688 326	19 120 937	1 135 370	17 985 567	6,690	7,113	0,059
2024	2 697 103	19 622 758	1 513 827	18 108 931	6,714	7,275	0,077
2025	2 712 464	20 186 529	1 892 284	18 294 245	6,745	7,442	0,094
2026	2 733 969	20 812 604	2 270 740	18 541 864	6,782	7,613	0,109
2027	2 832 101	22 053 465	2 649 197	19 404 268	6,852	7,787	0,120
2028	2 946 209	23 467 497	3 027 654	20 439 843	6,938	7,965	0,129
2029	3 055 927	24 898 976	3 406 110	21 492 866	7,033	8,148	0,137
2030	3 061 413	25 515 003	3 784 567	21 730 436	7,098	8,334	0,148
2031	3 131 633	21 923 179	4 777 137	17 146 043	5,475	7,001	0,218
2032	3 194 699	22 876 936	5 211 422	17 665 515	5,530	7,161	0,228
2033	3 194 699	23 815 626	5 645 707	18 169 920	5,688	7,455	0,237
2034	3 361 033	25 183 207	6 079 992	19 103 215	5,684	7,493	0,241

2035	3 386 926	25 958 479	6 514 277	19 444 202	5,741	7,664	0,251
2036	3 397 898	26 639 070	6 948 562	19 690 508	5,795	7,840	0,261
2037	3 465 046	27 787 720	7 382 847	20 404 872	5,889	8,019	0,266
2038	3 465 046	28 424 191	7 817 132	20 607 059	5,947	8,203	0,275
2039	3 491 379	29 296 197	8 251 418	21 044 779	6,028	8,391	0,282
2040	3 491 379	29 967 220	8 685 703	21 281 517	6,095	8,583	0,290
2041	3 644 985	26 278 719	9 136 009	17 142 711	4,703	7,210	0,348
2042	3 644 985	26 880 627	9 571 057	17 309 571	4,749	7,375	0,356
2043	3 726 615	28 112 111	10 006 105	18 106 007	4,859	7,544	0,356
2044	3 726 615	28 756 013	10 441 153	18 314 860	4,915	7,716	0,363
2045	3 946 053	31 146 710	10 876 201	20 270 509	5,137	7,893	0,349
2046	3 946 053	31 860 118	11 311 249	20 548 870	5,207	8,074	0,355
2047	3 974 799	32 827 278	11 746 297	21 080 982	5,304	8,259	0,358
2048	3 974 799	33 579 180	12 181 345	21 397 835	5,383	8,448	0,363
2049	4 003 545	34 596 715	12 616 393	21 980 322	5,490	8,642	0,365

Cálculo del índice de intensidad:

$$TC = CB - AH$$

$$I_p = TC/P$$

$$I_i = (I_b - I_p) / I_b$$

TC: total consumo con ahorro

P: producción de proyección del cobre

CB: consumo de energía BAU

AH: ahorro de energía con SGE

I_p: Intensidad promedio con SGE

I_b: intensidad promedio BAU

I_i: índice de intensidad

Resultados de los indicadores de intensidad energética mejorados, cuyas columnas facilitan graficar la Ilustración 28.

		2021-2030	2031-2040	2041-2049
		0.0943	0.25482	0.3569
Ley de cabeza Cu	Intensidad BAU MWh/T	Intensidad de mejoras SGE MWh/T	Intensidad de mejoras SGE MWh/T	Intensidad de mejoras SGE MWh/T
0,001	60,351279	54,6601534	44,9725661	38,8119075
0,005	33,4860142	30,328283	24,953108	21,5348557
0,01	25,9828316	23,5326506	19,3618864	16,709559
0,02	20,1608807	18,2597097	15,0234851	12,9654624
0,05	14,4166202	13,0571329	10,742977	9,27132844
0,1	11,1863004	10,1314323	8,33580734	7,19390979
0,15	9,64355313	8,73416607	7,18618292	6,20176902
0,2	8,67979563	7,86129091	6,46801011	5,58197657
0,25	7,99908727	7,24477334	5,96075985	5,14421302
0,3	7,48273042	6,77710894	5,57598105	4,81214393
0,315	7,35029578	6,65716289	5,47729341	4,72697521
0,35	7,07224951	6,40533638	5,27009889	4,54816366
0,4	6,73492124	6,09981817	5,01872861	4,33122785
0,415	6,6447841	6,01818096	4,95156022	4,27326066
0,45	6,45075724	5,84245083	4,80697528	4,14848198
0,5	6,20673862	5,62144317	4,62513749	3,99155361
0,55	5,99395853	5,42872824	4,46657802	3,85471473

0,6	5,8060814	5,25856793	4,32657574	3,73389095
0,65	5,63845592	5,10674953	4,20166458	3,626091
0,7	5,4875766	4,97009813	4,08923233	3,52906051
0,75	5,35074255	4,84616753	3,98726634	3,44106254
0,8	5,22583319	4,73303712	3,89418638	3,36073333
0,85	5,11115618	4,62917415	3,80873136	3,28698454
0,9	5,00534157	4,53333786	3,72988043	3,21893517
0,95	4,90726644	4,44451122	3,65679681	3,15586305
1	4,816	4,3618512	3,58878688	3,0971696

	2021-2030	2031-2040	2041-2049
lip	0,0943	0,2548	0,3569

lip: índice de intensidad promedio cada 10 años

Im: intensidad con mejoras SGE

Ib: intensidad BAU

$Im = Ib - lip * Ib$

Este último es un valor que, al ser reemplazado, hace menos intensiva la intensidad energética con respecto al año anterior (MWh/T).

Anexo 6. Cálculo para hallar el indicador energético de intensidad con la implementación de mejoras tecnológicas

Resultados calculados del índice de intensidad que modifica el indicador de intensidad energético con la aplicación de mejoras tecnológicas por etapas.

Año	Producción de Cu futuro	Consumo de energía BAU	Total ahorro con mejoras	Total consumo de energía	Intensidad promedio con mejoras	Intensidad promedio BAU	Índice de mejor intensidad
	TMF	MWh	MWh	MWh	MWh/TMF	MWh/TMF	
2021	2 326 035	15 811 500	275 204	15 536 296	6,679	6,798	0,017
2022	2 396 255	16 661 920	550 409	16 111 512	6,724	6,953	0,033
2023	2 688 326	19 120 937	825 613	18 295 324	6,805	7,113	0,043
2024	2 697 103	19 622 758	1 100 817	18 521 941	6,867	7,275	0,056
2025	2 712 464	20 186 529	1 376 021	18 810 507	6,935	7,442	0,068
2026	2 733 969	20 812 604	1 651 226	19 161 379	7,009	7,613	0,079
2027	2 832 101	22 053 465	1 926 430	20 127 035	7,107	7,787	0,087
2028	2 946 209	23 467 497	2 201 634	21 265 863	7,218	7,965	0,094
2029	3 055 927	24 898 976	2 476 838	22 422 138	7,337	8,148	0,099
2030	3 061 413	25 515 003	2 752 043	22 762 961	7,435	8,334	0,108
2031	3 131 633	21 923 179	3 378 886	18 544 293	5,922	7,001	0,154
2032	3 194 699	22 876 936	3 686 058	19 190 879	6,007	7,161	0,161
2033	3 194 699	23 815 626	3 993 229	19 822 397	6,205	7,455	0,168
2034	3 361 033	25 183 207	4 300 401	20 882 806	6,213	7,493	0,171

2035	3 386 926	25 958 479	4 607 572	21 350 907	6,304	7,664	0,177
2036	3 397 898	26 639 070	4 914 743	21 724 327	6,393	7,840	0,184
2037	3 465 046	27 787 720	5 221 915	22 565 805	6,512	8,019	0,188
2038	3 465 046	28 424 191	5 529 086	22 895 105	6,607	8,203	0,195
2039	3 491 379	29 296 197	5 836 258	23 459 939	6,719	8,391	0,199
2040	3 491 379	29 967 220	6 143 429	23 823 790	6,824	8,583	0,205
2041	3 644 985	26 278 719	6 479 813	19 798 906	5,432	7,210	0,247
2042	3 644 985	26 880 627	6 788 376	20 092 251	5,512	7,375	0,253
2043	3 726 615	28 112 111	7 096 938	21 015 173	5,639	7,544	0,252
2044	3 726 615	28 756 013	7 405 501	21 350 512	5,729	7,716	0,258
2045	3 946 053	31 146 710	7 714 064	23 432 646	5,938	7,893	0,248
2046	3 946 053	31 860 118	8 022 626	23 837 492	6,041	8,074	0,252
2047	3 974 799	32 827 278	8 331 189	24 496 090	6,163	8,259	0,254
2048	3 974 799	33 579 180	8 639 751	24 939 429	6,274	8,448	0,257
2049	4 003 545	34 596 715	8 948 314	25 648 401	6,406	8,642	0,259

Cálculo del índice de intensidad:

$$TC = CB - AH$$

$$I_p = TC/P$$

$$I_i = (I_b - I_p) / I_b$$

TC: total consumo con ahorro

P: producción de proyección del cobre

CB: consumo de energía BAU

AH: ahorro de energía con mejoras tecnológicas

I_p : Intensidad promedio con mejoras tecnológicas

I_b : intensidad promedio BAU

I_i : índice de intensidad

Resultados de los indicadores de intensidad energética mejorados, cuyas columnas facilitan graficar la Ilustración 29.

		2021-2030	2031-2040	2041-2049
		0,069	0,18	0,253
Ley de cabeza Cu	Intensidad BAU MWh/T	Intensidad con mejoras MWh/T	Intensidad con mejoras MWh/T	Intensidad con mejoras MWh/T
0,001	60,351	56,1870407	49,4880488	45,0824054
0,005	33,486	31,1754792	27,4585316	25,0140526
0,010	25,983	24,1900162	21,3059219	19,4091752
0,020	20,161	18,7697799	16,5319222	15,0601779
0,050	14,417	13,4218734	11,8216285	10,7692153
0,100	11,186	10,4144457	9,17276634	8,35616641
0,150	9,644	8,97814796	7,90771357	7,20373419
0,200	8,680	8,08088974	7,11743242	6,48380734
0,250	7,999	7,44715025	6,55925156	5,97531819
0,300	7,483	6,96642202	6,13583894	5,58959962
0,315	7,350	6,84312537	6,02724254	5,49067095
0,35	7,072	6,58426429	5,7992446	5,28297038
0,4	6,735	6,27021168	5,52263542	5,03098617
0,415	6,645	6,186294	5,44872297	4,96365373
0,45	6,451	6,00565499	5,28962093	4,81871566
0,5	6,207	5,77847366	5,08952567	4,63643375

0,55	5,994	5,58037539	4,91504599	4,47748702
0,6	5,806	5,40546179	4,76098675	4,33714281
0,65	5,638	5,24940246	4,62353386	4,21192657
0,7	5,488	5,10893382	4,49981281	4,09921972
0,75	5,351	4,98154132	4,38760889	3,99700469
0,8	5,226	4,8652507	4,28518322	3,90369739
0,85	5,111	4,7584864	4,19114806	3,81803366
0,9	5,005	4,659973	4,10438009	3,73899015
0,95	4,907	4,56866506	4,02395848	3,66572803
1	4,816	4,483696	3,94912	3,597552

	2021-2030	2031-2040	2041-2049
lip	0,069	0,180	0,253

lip: índice de intensidad promedio cada 10 años

Im: intensidad con mejoras tecnológicas

Ib: intensidad BAU

Im: Ib – lip*Ib,

Este último valor, al ser reemplazado, hace menos intensiva la intensidad energética con respecto al año anterior (MWh/T)

Anexo 7. Cálculo para hallar la intensidad de la emisión de gases CO₂ implementando SGE

Resultados calculados del índice de intensidad que modifica la intensidad de emisiones con la aplicación del SGE.

Año	Producción de Cu proyectada TMF	Emisión de gases BAU tCO ₂ eq	Emisión ahorro con SGE tCO ₂ eq	Intensidad promedio con SGE tCO ₂ eq/t	Intensidad promedio BAU tCO ₂ eq/t	Índice de intensidad con SGE
2021	2 326 035	2 387 537	57 147	1,002	1,026	0,024
2022	2 396 255	2 515 950	114 294	1,002	1,050	0,045
2023	2 688 326	2 887 261	171 441	1,010	1,074	0,059
2024	2 697 103	2 963 036	228 588	1,014	1,099	0,077
2025	2 712 464	3 048 166	285 735	1,018	1,124	0,094
2026	2 733 969	3 142 703	342 882	1,024	1,150	0,109
2027	2 832 101	3 330 073	400 029	1,035	1,176	0,120
2028	2 946 209	3 543 592	457 176	1,048	1,203	0,129
2029	3 055 927	3 759 745	514 323	1,062	1,230	0,137
2030	3 061 413	3 852 765	571 470	1,072	1,258	0,148
2031	3 131 633	3 310 400	721 348	0,827	1,057	0,218
2032	3 194 699	3 454 417	786 925	0,835	1,081	0,228
2033	3 194 699	3 596 160	852 502	0,859	1,126	0,237
2034	3 361 033	3 802 664	918 079	0,858	1,131	0,241
2035	3 386 926	3 919 730	983 656	0,867	1,157	0,251

2036	3 397 898	4 022 500	1 049 233	0,875	1,184	0,261
2037	3 465 046	4 195 946	1 114 810	0,889	1,211	0,266
2038	3 465 046	4 292 053	1 180 387	0,898	1,239	0,275
2039	3 491 379	4 423 726	1 245 964	0,910	1,267	0,282
2040	3 491 379	4 525 050	1 311 541	0,920	1,296	0,290
2041	3 644 985	3 968 087	1 379 537	0,710	1,089	0,348
2042	3 644 985	4 058 975	1 445 230	0,717	1,114	0,356
2043	3 726 615	4 244 929	1 510 922	0,734	1,139	0,356
2044	3 726 615	4 342 158	1 576 614	0,742	1,165	0,363
2045	3 946 053	4 703 153	1 642 306	0,776	1,192	0,349
2046	3 946 053	4 810 878	1 707 999	0,786	1,219	0,355
2047	3 974 799	4 956 919	1 773 691	0,801	1,247	0,358
2048	3 974 799	5 070 456	1 839 383	0,813	1,276	0,363
2049	4 003 545	5 224 104	1 905 075	0,829	1,305	0,365

Cálculo del índice de intensidad:

$$I_p = (CB - AH) / P$$

$$I_i = (I_b - I_p) / I_b$$

CB: emisión de gases BAU

P: producción de proyección del cobre

AH: ahorro de emisiones con SGE

I_p: Intensidad promedio con SGE

I_b: intensidad promedio BAU

I_i: índice de intensidad

Resultados de los indicadores de intensidad de emisiones mejorados, cuyas columnas facilitan graficar la Ilustración 30.

	2021-2030	2031-2040	2041-2049	
	0,0943	0,2548	0,3569	
Ley de cabeza Cu	Intensidad BAU tCO ₂ eq/T	Intensidad con mejoras SGE tCO ₂ eq/T	Intensidad con mejoras SGE tCO ₂ eq/T	Intensidad con mejoras SGE tCO ₂ eq/T
0,001	9,113	8,254	6,791	5,861
0,005	5,056	4,580	3,768	3,252
0,010	3,923	3,553	2,924	2,523
0,020	3,044	2,757	2,269	1,958
0,050	2,177	1,972	1,622	1,400
0,100	1,689	1,530	1,259	1,086
0,150	1,456	1,319	1,085	0,936
0,200	1,311	1,187	0,977	0,843
0,250	1,208	1,094	0,900	0,777
0,300	1,130	1,023	0,842	0,727
0,315	1,110	1,005	0,827	0,714
0,35	1,068	0,967	0,796	0,687
0,4	1,017	0,921	0,758	0,654
0,415	1,003	0,909	0,748	0,645
0,45	0,974	0,882	0,726	0,626
0,5	0,937	0,849	0,698	0,603
0,55	0,905	0,820	0,674	0,582

0,6	0,877	0,794	0,653	0,564
0,65	0,851	0,771	0,634	0,548
0,7	0,829	0,750	0,617	0,533
0,75	0,808	0,732	0,602	0,520
0,8	0,789	0,715	0,588	0,507
0,85	0,772	0,699	0,575	0,496
0,9	0,756	0,685	0,563	0,486
0,95	0,741	0,671	0,552	0,477
1	0,727	0,659	0,542	0,468

	2021-2030	2031-2040	2041-2049
lip	0,0943	0,2548	0,3569

lip: índice de intensidad promedio de 10 años

Im: intensidad con mejoras SGE

Ib: intensidad BAU

$Im = Ib - lip * Ib$



Anexo 8. Cálculo para hallar la intensidad de emisiones de gases CO₂ con la implementación de mejoras tecnológicas

Resultados calculados del índice de intensidad que modifica la intensidad de emisiones con la aplicación de mejoras tecnológicas por etapas.

Año	Producción de Cu futuro	Emisión de gases BAU	Ahorro con mejoras	Intensidad promedio con mejoras	Intensidad promedio BAU	Índice de intensidad con mejoras
	TMF	tCO ₂ eq	tCO ₂ eq	tCO ₂ eq/t	tCO ₂ eq/t	
2021	2 326 035	2 387 537	41 556	1,009	1,026	0,017
2022	2 396 255	2 515 950	83 112	1,015	1,050	0,033
2023	2 688 326	2 887 261	124 668	1,028	1,074	0,043
2024	2 697 103	2 963 036	166 223	1,037	1,099	0,056
2025	2 712 464	3 048 166	207 779	1,047	1,124	0,068
2026	2 733 969	3 142 703	249 335	1,058	1,150	0,079
2027	2 832 101	3 330 073	290 891	1,073	1,176	0,087
2028	2 946 209	3 543 592	332 447	1,090	1,203	0,094
2029	3 055 927	3 759 745	374 003	1,108	1,230	0,099
2030	3 061 413	3 852 765	415 558	1,123	1,258	0,108
2031	3 131 633	3 310 400	510 212	0,894	1,057	0,154
2032	3 194 699	3 454 417	556 595	0,907	1,081	0,161
2033	3 194 699	3 596 160	602 978	0,937	1,126	0,168

2034	3 361 033	3 802 664	649 360	0,938	1,131	0,171
2035	3 386 926	3 919 730	695 743	0,952	1,157	0,177
2036	3 397 898	4 022 500	742 126	0,965	1,184	0,184
2037	3 465 046	4 195 946	788 509	0,983	1,211	0,188
2038	3 465 046	4 292 053	834 892	0,998	1,239	0,195
2039	3 491 379	4 423 726	881 275	1,015	1,267	0,199
2040	3 491 379	4 525 050	927 658	1,030	1,296	0,205
2041	3 644 985	3 968 087	978 452	0,820	1,089	0,247
2042	3 644 985	4 058 975	1 025 045	0,832	1,114	0,253
2043	3 726 615	4 244 929	1 071 638	0,852	1,139	0,252
2044	3 726 615	4 342 158	1 118 231	0,865	1,165	0,258
2045	3 946 053	4 703 153	1 164 824	0,897	1,192	0,248
2046	3 946 053	4 810 878	1 211 417	0,912	1,219	0,252
2047	3 974 799	4 956 919	1 258 009	0,931	1,247	0,254
2048	3 974 799	5 070 456	1 304 602	0,947	1,276	0,257
2049	4 003 545	5 224 104	1 351 195	0,967	1,305	0,259

Cálculo del índice de intensidad:

$$I_p = (CB - AH) / P$$

$$I_i = (I_b - I_p) / I_b$$

CB: emisión de gases BAU

P: producción de proyección del cobre

AH: ahorro de emisiones con mejoras tecnológicas

I_p: Intensidad promedio con mejoras tecnológicas

I_b: intensidad promedio BAU

I_i: índice de intensidad

Resultados de los indicadores de intensidad de emisiones mejorados, cuyas columnas facilitan graficar la Ilustración 31.

		2021-2030	2031-2040	2041-2049
		0,0685	0,1802	0,2531
Ley de cabeza Cu	Intensidad BAU tCO ₂ eq/T	Intensidad con mejoras tecnológicas tCO ₂ eq/T	Intensidad con mejoras tecnológicas tCO ₂ eq/T	Intensidad con mejoras tecnológicas tCO ₂ eq/T
0,001	9,113	8,489	7,471	6,807
0,005	5,056	4,710	4,145	3,777
0,010	3,923	3,655	3,216	2,930
0,020	3,044	2,836	2,496	2,274
0,050	2,177	2,028	1,785	1,626
0,100	1,689	1,573	1,385	1,262
0,150	1,456	1,356	1,194	1,088
0,200	1,311	1,221	1,074	0,979
0,250	1,208	1,125	0,990	0,902
0,300	1,130	1,052	0,926	0,844
0,315	1,110	1,034	0,910	0,829
0,35	1,068	0,995	0,875	0,798
0,4	1,017	0,947	0,834	0,760
0,415	1,003	0,935	0,823	0,749
0,45	0,974	0,907	0,799	0,728
0,5	0,937	0,873	0,768	0,700
0,55	0,905	0,843	0,742	0,676
0,6	0,877	0,817	0,719	0,655

0,65	0,851	0,793	0,698	0,636
0,7	0,829	0,772	0,679	0,619
0,75	0,808	0,753	0,662	0,603
0,8	0,789	0,735	0,647	0,589
0,85	0,772	0,719	0,633	0,576
0,9	0,756	0,704	0,620	0,565
0,95	0,741	0,690	0,607	0,553
1	0,727	0,677	0,596	0,543

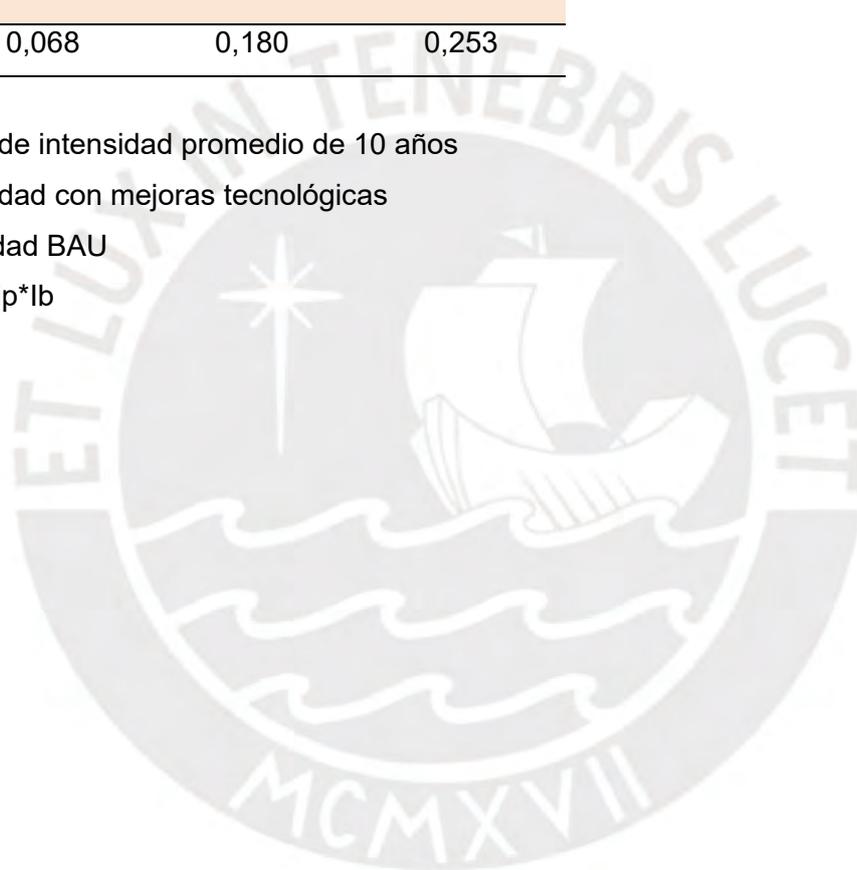
	2021-2030	2031-2040	2041-2049
lip	0,068	0,180	0,253

lip: índice de intensidad promedio de 10 años

Im: intensidad con mejoras tecnológicas

Ib: intensidad BAU

$Im = Ib - lip \cdot Ib$



Anexo 9. Cálculo para hallar la intensidad de la emisión de gases CO₂ implementando SGE y fuentes de recursos de energías renovables (RER)

Resultados calculados del índice de intensidad que modifica la intensidad de emisiones con la aplicación de SGE y la introducción de fuentes RER.

Año	Producción de Cu futuro TMF	Emisión de gases BAU tCO ₂ eq	Ahorro SGE tCO ₂ eq	Ahorro RER tCO ₂ eq	Total ahorro SGE/RER tCO ₂ eq	Intensidad promedio SGE/RER tCO ₂ eq/T	Intensidad promedio BAU tCO ₂ eq/T	Índice de intensidad SGE/RER
2021	2 326 035	2 387 537	57 147	57 147	114 294	0,977	1,026	0,048
2022	2 396 255	2 515 950	114 294	114 294	228 588	0,955	1,050	0,091
2023	2 688 326	2 887 261	171 441	171 441	342 882	0,946	1,074	0,119
2024	2 697 103	2 963 036	228 588	228 588	457 176	0,929	1,099	0,154
2025	2 712 464	3 048 166	285 735	285 735	571 470	0,913	1,124	0,187
2026	2 733 969	3 142 703	342 882	342 882	685 764	0,899	1,150	0,218
2027	2 832 101	3 330 073	400 029	400 029	800 057	0,893	1,176	0,240
2028	2 946 209	3 543 592	457 176	457 176	914 351	0,892	1,203	0,258
2029	3 055 927	3 759 745	514 323	514 323	1 028 645	0,894	1,230	0,274
2030	3 061 413	3 852 765	571 470	571 470	1 142 939	0,885	1,258	0,297
2031	3 131 633	3 310 400	721 348	1 287 991	2 009 338	0,415	1,057	0,607
2032	3 194 699	3 454 417	786 925	1 405 081	2 192 005	0,395	1,081	0,635

2033	3 194 699	3 596 160	852 502	1 522 171	2 374 673	0,382	1,126	0,660
2034	3 361 033	3 802 664	918 079	1 639 261	2 557 340	0,371	1,131	0,673
2035	3 386 926	3 919 730	983 656	1 756 351	2 740 007	0,348	1,157	0,699
2036	3 397 898	4 022 500	1 049 233	1 873 441	2 922 674	0,324	1,184	0,727
2037	3 465 046	4 195 946	1 114 810	1 990 531	3 105 341	0,315	1,211	0,740
2038	3 465 046	4 292 053	1 180 387	2 107 621	3 288 008	0,290	1,239	0,766
2039	3 491 379	4 423 726	1 245 964	2 224 711	3 470 675	0,273	1,267	0,785
2040	3 491 379	4 525 050	1 311 541	2 341 801	3 653 342	0,250	1,296	0,807
2041	3 644 985	3 968 087	1 379 537	2 207 260	3 586 797	0,105	1,089	0,904
2042	3 644 985	4 058 975	1 445 230	2 312 367	3 757 597	0,083	1,114	0,926
2043	3 726 615	4 244 929	1 510 922	2 417 475	3 928 397	0,085	1,139	0,925
2044	3 726 615	4 342 158	1 576 614	2 522 582	4 099 197	0,065	1,165	0,944
2045	3 946 053	4 703 153	1 642 306	2 627 690	4 269 996	0,110	1,192	0,908
2046	3 946 053	4 810 878	1 707 999	2 732 798	4 440 796	0,094	1,219	0,923
2047	3 974 799	4 956 919	1 773 691	2 837 905	4 611 596	0,087	1,247	0,930
2048	3 974 799	5 070 456	1 839 383	2 943 013	4 782 396	0,072	1,276	0,943
2049	4 003 545	5 224 104	1 905 075	3 048 121	4 953 196	0,068	1,305	0,948

Cálculo del índice de intensidad:

$$AT = AG + AR$$

$$I_p = (EG - AT) / P$$

$$I_i = (I_b - I_p) / I_b$$

AT: ahorro total

AR: ahorro de emisiones por ingreso de fuentes RER

AG: ahorro de emisiones con SGE

EG: emisión de gases BAU

P: producción de proyección del cobre

I_p: Intensidad promedio SGE/RER

I_b: intensidad promedio BAU

I_i: índice de intensidad

Resultados de los indicadores de intensidad de emisiones mejorados, cuyas columnas facilitan graficar la Ilustración 32.

		2021-2030	2031-2040	2041-2049
		0,189	0,710	0,928
Ley de cabeza Cu	Intensidad BAU tCO ₂ eq/T	Intensidad SGE/RER tCO ₂ eq/T	Intensidad SGE/RER tCO ₂ eq/T	Intensidad SGE/RER tCO ₂ eq/T
0,001	9,113	7,391	2,643	0,656
0,005	5,056	4,101	1,466	0,364
0,010	3,923	3,182	1,138	0,282
0,020	3,044	2,469	0,883	0,219
0,050	2,177	1,765	0,631	0,157
0,100	1,689	1,370	0,490	0,122
0,150	1,456	1,181	0,422	0,105
0,200	1,311	1,063	0,380	0,094
0,250	1,208	0,980	0,350	0,087
0,300	1,130	0,916	0,328	0,081
0,315	1,110	0,900	0,322	0,080
0,35	1,068	0,866	0,310	0,077
0,4	1,017	0,825	0,295	0,073
0,415	1,003	0,814	0,291	0,072
0,45	0,974	0,790	0,282	0,070

0,5	0,937	0,760	0,272	0,067
0,55	0,905	0,734	0,262	0,065
0,6	0,877	0,711	0,254	0,063
0,65	0,851	0,690	0,247	0,061
0,7	0,829	0,672	0,240	0,060
0,75	0,808	0,655	0,234	0,058
0,8	0,789	0,640	0,229	0,057
0,85	0,772	0,626	0,224	0,056
0,9	0,756	0,613	0,219	0,054
0,95	0,741	0,601	0,215	0,053
1	0,727	0,590	0,211	0,052

	2021-2030	2031-2040	2041-2049
lip	0,189	0,710	0,928

lip: índice de intensidad promedio de 10 años

Im: intensidad con mejoras SGE y RER

Ib: intensidad BAU

$Im = Ib - lip * Ib$

Anexo 10. Cálculo para hallar la intensidad de emisiones de gases CO₂ con la implementación de mejoras tecnológicas y fuentes RER

Resultados calculados del índice de intensidad que modifica la intensidad de emisiones con la aplicación de mejoras tecnológicas y la introducción de fuentes RER.

Año	Producción Cu futuro TMF	Emisión de gases BAU tCO ₂ eq	Ahorro con mejoras tCO ₂ eq	Ahorro RER tCO ₂ eq	Total ahorro con mejoras RER tCO ₂ eq	Intensidad promedio con mejoras RER tCO ₂ eq/T	Intensidad promedio BAU tCO ₂ eq/T	Índice de intensidad con mejoras RER
2021	2 326 035	2 387 537	41 556	57 147	98 703	0,984	1,026	0,041
2022	2 396 255	2 515 950	83 112	114 294	197 406	0,968	1,050	0,078
2023	2 688 326	2 887 261	124 668	171 441	296 108	0,964	1,074	0,103
2024	2 697 103	2 963 036	166 223	228 588	394 811	0,952	1,099	0,133
2025	2 712 464	3 048 166	207 779	285 735	493 514	0,942	1,124	0,162
2026	2 733 969	3 142 703	249 335	342 882	592 217	0,933	1,150	0,188
2027	2 832 101	3 330 073	290 891	400 029	690 920	0,932	1,176	0,207
2028	2 946 209	3 543 592	332 447	457 176	789 622	0,935	1,203	0,223
2029	3 055 927	3 759 745	374 003	514 323	888 325	0,940	1,230	0,236
2030	3 061 413	3 852 765	415 558	571 470	987 028	0,936	1,258	0,256
2031	3 131 633	3 310 400	510 212	1 287 991	1 798 202	0,483	1,057	0,543
2032	3 194 699	3 454 417	556 595	1 405 081	1 961 675	0,467	1,081	0,568
2033	3 194 699	3 596 160	602 978	1 522 171	2 125 148	0,460	1,126	0,591

2034	3 361 033	3 802 664	649 360	1 639 261	2 288 621	0,450	1,131	0,602
2035	3 386 926	3 919 730	695 743	1 756 351	2 452 094	0,433	1,157	0,626
2036	3 397 898	4 022 500	742 126	1 873 441	2 615 567	0,414	1,184	0,650
2037	3 465 046	4 195 946	788 509	1 990 531	2 779 040	0,409	1,211	0,662
2038	3 465 046	4 292 053	834 892	2 107 621	2 942 513	0,389	1,239	0,686
2039	3 491 379	4 423 726	881 275	2 224 711	3 105 986	0,377	1,267	0,702
2040	3 491 379	4 525 050	927 658	2 341 801	3 269 459	0,360	1,296	0,723
2041	3 644 985	3 968 087	978 452	2 207 260	3 185 711	0,215	1,089	0,803
2042	3 644 985	4 058 975	1 025 045	2 312 367	3 337 412	0,198	1,114	0,822
2043	3 726 615	4 244 929	1 071 638	2 417 475	3 489 113	0,203	1,139	0,822
2044	3 726 615	4 342 158	1 118 231	2 522 582	3 640 813	0,188	1,165	0,838
2045	3 946 053	4 703 153	1 164 824	2 627 690	3 792 514	0,231	1,192	0,806
2046	3 946 053	4 810 878	1 211 417	2 732 798	3 944 214	0,220	1,219	0,820
2047	3 974 799	4 956 919	1 258 009	2 837 905	4 095 915	0,217	1,247	0,826
2048	3 974 799	5 070 456	1 304 602	2 943 013	4 247 615	0,207	1,276	0,838
2049	4 003 545	5 224 104	1 351 195	3 048 121	4 399 316	0,206	1,305	0,842

Resultados de los indicadores de intensidad de emisiones mejorados, cuyas columnas facilitan graficar la Ilustración 33.

		2021-2030	2031-2040	2041-2049
		0,1629	0,6352	0,8242
Ley de cabeza Cu	Intensidad BAU tCO ₂ eq/T	Intensidad con mejoras/ RER tCO ₂ eq/T	Intensidad con mejoras/ RER tCO ₂ eq/T	Intensidad con mejoras/ RER tCO ₂ eq/T
0,001	9,113	7,629	3,324	1,602
0,005	5,056	4,233	1,845	0,889
0,010	3,923	3,284	1,431	0,690
0,020	3,044	2,548	1,111	0,535
0,050	2,177	1,822	0,794	0,383
0,100	1,689	1,414	0,616	0,297
0,150	1,456	1,219	0,531	0,256
0,200	1,311	1,097	0,478	0,230
0,250	1,208	1,011	0,441	0,212
0,300	1,130	0,946	0,412	0,199
0,315	1,110	0,929	0,405	0,195
0,35	1,068	0,894	0,390	0,188
0,4	1,017	0,851	0,371	0,179
0,415	1,003	0,840	0,366	0,176
0,45	0,974	0,815	0,355	0,171
0,5	0,937	0,785	0,342	0,165
0,55	0,905	0,758	0,330	0,159
0,6	0,877	0,734	0,320	0,154
0,65	0,851	0,713	0,311	0,150
0,7	0,829	0,694	0,302	0,146
0,75	0,808	0,676	0,295	0,142
0,8	0,789	0,661	0,288	0,139
0,85	0,772	0,646	0,282	0,136
0,9	0,756	0,633	0,276	0,133
0,95	0,741	0,620	0,270	0,130
1	0,727	0,609	0,265	0,128

Anexo 11. Empresa minera con certificación ISO 50001



Certificate PE18/819942814
The management system of

GOLD FIELDS LA CIMA S.A.

UEA Carolina N°1 - Paraje Coymolache Nro. 9045
Sector Predio La Jalca Hualgayoc, Cajamarca - Perú

has been assessed and certified as meeting the requirements of

ISO 50001:2018

For the following activities

"Extracción de Mineral, Procesamiento, Despacho de Concentrado de Cobre en la UEA Carolina N.º 1 ubicada en el Distrito de Hualgayoc"

"Process developed from mineral extraction, processing and dispatch of copper concentrate in the UEA Carolina N°1 located in the District of Hualgayoc"

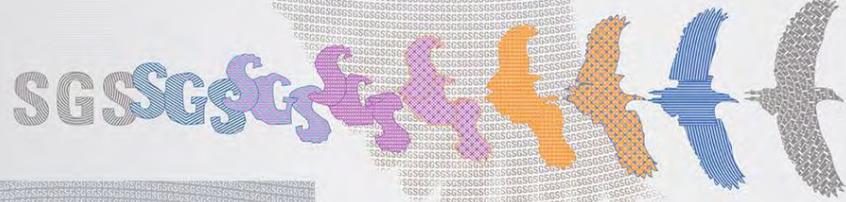
This certificate is valid from 01 July 2021 until 30 June, 2024 and remains valid subject to satisfactory surveillance audits.
Re certification audit due before April 30, 2024
Issue 2. Certified since 01 July 2018

Authorised by



Julio Ubarnes Pinto
SGS del Perú S.A.C.
Av. Elmer Faucett N° 3348 - Urb. Bocanegra, Callao, Lima, Perú.
Tel. (511) 517-1900- Fax: 484-4272 - www.pe.sgs.com

Page 1 of 1



This document is a Web version of SGS certificate for electronic use exclusively. It shall only be available by clicking on SGS Certification Mark which has been posted on Your website. It shall not be printed in anyway. This document is copyright protected. No content or appearance may be reproduced without the express written permission of SGS. Any misuse, alteration, forgery or falsification is unlawful.

Anexo 12. Inventario nacional de GEI de emisiones antropogénicas por fuentes y remociones por sumideros de todos los GEI, año 2016

	Fuentes y sumideros de GEI	Emisiones de CO ₂ (GgCO ₂)	Remociones de CO ₂ (GgCO ₂ eq)	Emisiones de CH ₄ (GgCO ₂ eq)	Emisiones de N ₂ O (GgCO ₂ eq)	Emisiones totales de GEI (GgCO ₂ eq)	Emisiones netas De GEI (GgCO ₂ eq)
1	Energía	50 039,16	-	7 655,39	437,98	58 132,54	58 132,54
1A	Actividades de quema de combustibles	49 669,45	-	767,97	436,93	50 874,36	50 874,36
1A1	Industrias de energía	15 904,70	-	13,44	28,37	15 946,50	15 946,50
1A2	Industrias de manufactura y de construcción	8 386,47	-	15,76	33,31	8 435,54	8 435,54
1A3	Transporte	20 557,46	-	163,11	327,3	21 047,88	21 047,88
1A4	Otros sectores	4 820,82	-	575,66	47,96	5 444,44	5 444,44
1B	Emisiones fugitivas provenientes de la fabricación de combustibles	369,71	-	6 887,43	1,05	7 258,18	7 258,18

2	Procesos industriales y uso de productos	5 690,95	-	0,003	131,41	5 822,37	5 822,37
2A	Industria de los minerales	5 054,11	-	-	-	5 054,11	5 054,11
2B	Industria química	0,06	-	-	131,41	131,47	131,47
2C	Industria de los metales	636,78	-	0,003	-	636,79	636,79
3	Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra	112 949,47	-3 695,64	13 622,93	12 024,83	138 597,23	134 901,58
4	Desechos	61,67	-	5 958,16	417,85	6 437,67	6 437,67
	Emisiones de GEI (GgCO ₂ eq)	168 741,25	-3 695,64	27 236,48	13 012,07	208 989,81	205 294,16