



Programa de Energías
Renovables y Eficiencia
Energética en Chile



Construcción de Indicadores de Desempeño Energético (IDE) para el sector Minero en Chile

Trabajo realizado en el marco de la Red de Eficiencia Energética y Reducción de Emisiones
Documento Final Público



Diciembre 2021



Edición:

Deutsche Gesellschaft für
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Friedrich-Ebert-Allee 40
53113 Bonn • Alemania

Dag-Hammarskjöld-Weg 1-5
65760 Eschborn • Alemania

Nombre del proyecto:

Eficiencia Energética en Minería en Chile

Marchant Pereira 150
7500654 Providencia
Santiago • Chile
T +56 22 30 68 600
I www.giz.de

Responsable:

Rainer Schröer/ Rodrigo Vásquez / Javier Hueichapán

En coordinación:

Ministerio de Energía de Chile
Alameda 1449, Pisos 13 y 14, Edificio Santiago Downtown II
Santiago de Chile

T +56 22 367 3000
I www.minenergia.cl

Título:

Construcción de Indicadores de Desempeño Energético (IDE) para el sector Minero en Chile.

Trabajo realizado en el marco de la Red de Eficiencia Energética y Reducción de Emisiones.
Documento Final Público.

Acompañantes Técnicos Red:

Diego Lizana - Ecodesarrollo
Raúl Guzmán - JHG



Moderadora de la Red:

Valeria Ramírez

Aclaración:

Esta publicación ha sido preparada por encargo del proyecto “Eficiencia energética en la minería materias primas y clima” implementado por el Ministerio de Energía y Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH en el marco de la cooperación intergubernamental entre Chile y Alemania. El proyecto se financia a través de la Iniciativa internacional sobre el clima (IKI) del Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de Alemania - BMU. Sin perjuicio de ello, las conclusiones y opiniones de los autores no necesariamente reflejan la posición del Gobierno de Chile o de GIZ. Además, cualquier referencia a una empresa, producto, marca, fabricante u otro similar en ningún caso constituye una recomendación por parte del Gobierno de Chile o de GIZ.

Temario resultados trabajo IDE



1	Introducción	4
2	Objetivos del trabajo desarrollado sobre IDE	6
3	Resumen resultados trabajo IDE	8
4	IDE desarrollados por la Red	10
5	Conclusiones	21



1. Introducción

Introducción



La Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, en el marco de su proyecto “Eficiencia energética en la minería, materias primas y clima” del Programa de Energías Renovables y Eficiencia Energética, 4e; ha desarrollado la primera Red de Eficiencia Energética y reducción de emisiones para sector Minero en Chile, la cual esta conformada por empresas del Sector Minero de la gran, mediana y pequeña minería del Cobre y de la Minería no metálica.



En este marco, la Red de Eficiencia Energética y Reducción de Emisiones realizó una serie de reuniones, organizadas por la GIZ, empleando la metodología de Redes de Aprendizaje. Para éstas se trabajó en conjunto con moderadora y acompañantes técnicos de la Red, con el fin de trabajar en la construcción conjunta de Indicadores de Desempeño Energético (IDE).



2. Objetivos del trabajo desarrollado sobre IDE

Objetivos trabajo desarrollado sobre IDE



Las Compañías participantes de la Red de Aprendizaje han levantado la necesidad de trabajar en el desarrollo de IDE, reconociendo que:

1. Los IDE son importantes para mejorar la EE de los procesos y el cumplimiento de la Ley de Eficiencia Energética.
2. Se ve la necesidad de incorporar IDE complementarios a los entregados por Cochilco, utilizados en el sector minero, de manera de mejorar la gestión energética de las compañías.
3. Existe una necesidad de avanzar en la construcción de IDE más específicos.

Por lo tanto, los objetivos planteados en el desarrollo del trabajo desarrollado durante 6 sesiones de la Red fueron:

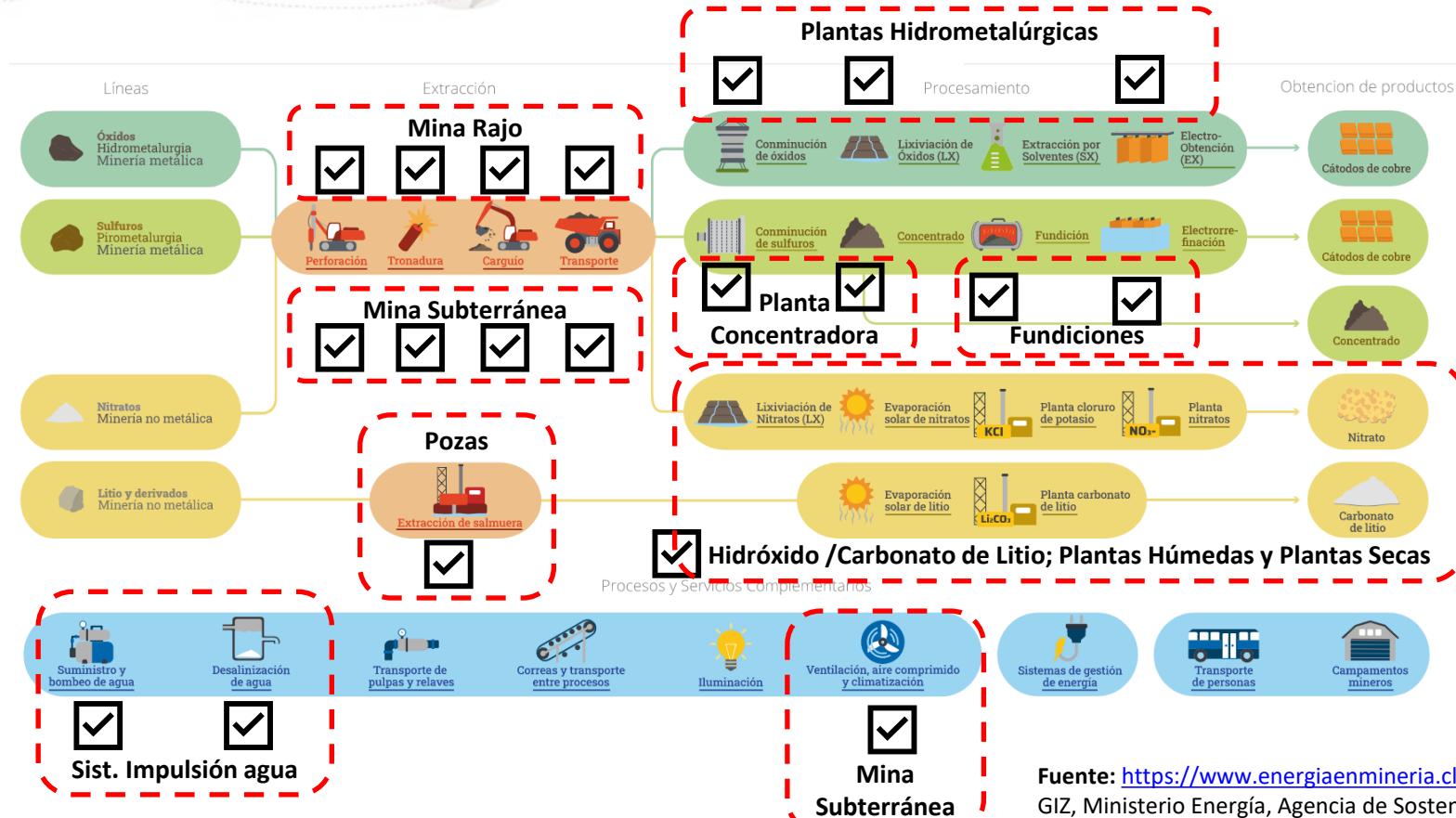
- Lograr a través de un trabajo colaborativo identificar los indicadores de procesos y generales, que permitan gestionar el uso adecuado de la energía y que actualmente están usando las Compañías mineras.
- Analizar y describir cualitativamente los IDE desarrollados de manera colaborativa, indicando particularidades de cada uno de ellos y aplicabilidad a distintos tipo de faenas considerando las variaciones de los procesos mineros.
- Seleccionar un grupo de IDE representativos.



3. Resumen resultados trabajo IDE

En el siguiente diagrama, se identifican los distintos subprocessos mineros en los cuales se analizaron los IDE

Resumen resultados trabajo IDE





4. IDE desarrollados por la Red

Se generaron un total de 27 IDE representativos

IDE desarrollados por la Red



IDE en Mina Rajo Abierto (3)

IDE en Mina Subterránea (3)

IDE Plantas Concentradoras (1)

IDE Plantas Hidrometalúrgica (4)

IDE en Fundiciones (3)

IDE Plantas Tratamiento Sales (12)

IDE Plantas desaladoras e impulsión de agua (1)

IDE desarrollados por la Red

□ Mina Rajo Abierto

Subproceso	IDEn Sugerido	Unida Base sugerida	Unidad Energética sugerida	Frecuencia de cálculo	Variables que podrían condicionar la evolución del indicador
Global Combustible	$\frac{\text{Energía Combustible Mina}}{\text{Toneladas mineral procesadas}}$	$GJ/kton$	$GJ/kton$	Mensual	<ul style="list-style-type: none"> • Antigüedad del Rajo. • Distancia media recorrida y pendiente media. • Tecnología de CAEX : (Eléctrico, Mecánico, Autónomo, manned) • Tipo de clima / estacionalidad en zona del rajo. • Ley de Corte y razón Lastre / mineral • Tecnologías de Carguío utilizada (Eléctrico, Hidráulico, Cargador Frontal, Autónomo) • Dureza Mineral
	$\frac{\text{Energía Combustible CAEX}}{\text{Mineral Movido} \cdot \text{Distancia Equivalente}}$				
Global Electricidad	$\frac{\text{Consumo total Energía Eléctrica Mina}}{\text{Toneladas mineral procesadas}}$	$kWh/kton$	$GJ/kton$	Mensual	
Total Mina	$\frac{\text{Consumo total Electricidad} + \text{Energía Combustible Mina}}{\text{Toneladas mineral procesadas}}$	$GJ/kton$	$GJ/kton$	Mensual	

Consideraciones:

- Se debe definir una metodología común de cálculo de la Distancia equivalente / distancia media recorrida para homogenizar criterios.
- Se elige como variable independiente de Indicador Global Mina el “total mineral procesado” en desmedro del “total mineral movido”.
- El límite de batería de subprocesos a considerar para determinación de los IDE globales de Mina Rajo Abierto son: Perforación, Tronadura, Carguío, Transporte, Chancado primario y Correas transporte a Planta (Stock Pile)

IDE desarrollados por la Red

Mina Subterránea

Subproceso	IDEn Sugerido	Unida Base sugerida	Unidad Energética sugerida	Frecuencia de cálculo	Variables que podrían condicionar la evolución del indicador
Global Combustible	$\frac{\text{Energía Combustible Mina}}{\text{Toneladas mineral extraídos}}$	GJ/kton	GJ/kton	Mensual	<ul style="list-style-type: none">• Antigüedad de las operaciones• Profundidad de la mina.• Distancia media equivalente acarreo Mineral.• Ley de Corte y distribución• Tecnología usada Transporte (Dumper, articulado, LHD, Tren y carros, etc.)• Tecnologías de Carguío utilizada (LHD, scoop, cargador de bajo perfil, etc.)• Dureza Mineral• No considerar el consumo de energía debido a ventilación túneles
Global Electricidad	$\frac{\text{Consumo total Energía Eléctrica Mina}}{\text{Toneladas mineral extraídos}}$	kWh/kton	GJ/kton	Mensual	<ul style="list-style-type: none">• Distancia total ductos de ventilación• Diámetro medio ductos de ventilación
Ventilación	$\frac{\text{Energía Eléctrica ventilación}}{\text{Nm3 ventilados}}$	kWh/Nm3	GJ/Nm3	Mensual	

Consideraciones:

- Se debe definir una metodología común de cálculo de la Distancia media de acarreo de mineral para homogenizar criterios.
- Se debe definir una metodología común de cálculo de la Distancia y diámetro medio de ductos de ventilación, además de estandarizar a un mismo criterio condiciones de normalización del Flujo de aire de ventilación.
- El límite de batería de subprocesos a considerar para determinación de los IDE globales de Mina Subterránea son: Perforación, Tronadura, Carguío, Transporte, Ventilación.

IDE desarrollados por la Red

Plantas Concentradoras

Subproceso	IDEn Sugerido	Unida Base sugerida	Unidad Energética sugerida	Frecuencia de cálculo	Variables que podrían condicionar la evolución del indicador
Planta Concentrador	$\frac{\text{Consumo de Energía Eléctrica Planta}}{\text{Mineral procesado}}$	kWh/kton	GJ/kton	Mensual	<ul style="list-style-type: none">Ley del Mineral procesado en PlantaDureza Mineral Procesado en Planta y metodología usada para su determinación (SPI, AxB)Granulometría Mineral Procesado en Planta (F80, T80, P80).% recuperación de agua.Tecnología de Molienda: SAG+Bolas, HPGR+Bolas, etc.

Consideraciones:

- El consumo de energía Eléctrica Planta, debe definir un alcance común de equipos/subprocesos a considerar: Molinos SAG, HPGR, Molinos Bolas, Bombas Bolas, Plantas de Chancado, Flotación, Filtros, Tratamiento de relaves, Bombas recirculación de agua, servicios apoyo como por ej.: Compresores de aire, otros.
- Adicionalmente al IDE, para este proceso se sugiere diseñar modelos matemáticos de Línea base Energética (LBE) que considere para el cálculo del consumo de energía variables de Mineral Procesado, granulometría y dureza.
- Se deberá considerar ajustes no rutinarios por variaciones en la dureza y granulometría del mineral a consecuencia del envejecimiento de los yacimientos

IDE desarrollados por la Red

□ Plantas Hidrometalúrgicas

Subproceso	IDEn Sugerido	Unida Base sugerida	Unidad Energética sugerida	Frecuencia de cálculo	Variables que podrían condicionar la evolución del indicador
Área Seca	$\frac{\text{Consumo total Energía Eléctrica Chancado}}{\text{Toneladas mineral procesadas}}$	$kWh/kton$	$GJ/kton$	Mensual	<ul style="list-style-type: none"> Dureza y metodología usada para su determinación (SPI, AxB) Granulometría Mineral
LIX	$\frac{\text{Consumo Energía Eléctrica LIX}}{\text{Toneladas mineral procesadas}}$	$kWh/kton$	$GJ/kton$	Mensual	<ul style="list-style-type: none"> Ley de Cu Mineral, % Recuperación Cu. Tipo de Pila: Heap, ROM, Sulfuros de baja ley. Tipo Apilamiento : Pila Estática / Pila Dinámica Tecnología de Acopio: Correas modulares + Apilador / Maquinaria Pesada. Distancia entre zona de recolección y acopio del mineral
	$\frac{\text{Consumo Combustible LIX}}{\text{Toneladas mineral procesadas}}$				
SX - EW	$\frac{\text{Consumo total de Energía Eléctrica SX/EW}}{\text{Ton Cu fino}}$	$kWh/kton$	$GJ/kton$	Mensual	<ul style="list-style-type: none"> Caracterización electrolito: Concentración de Cu, contenido de impurezas (Fierro, orgánico, otros) Eficiencia y Densidad de corriente Nave EW.
Total Planta	$\frac{\text{Consumo total Eléctricidad + Energía Combustible Planta}}{\text{Ton Cu fino}}$	$GJ/kton$	$GJ/kton$	Mensual	<ul style="list-style-type: none"> Ley de Cu Mineral, % Recuperación Cu. Tipo de Pila: Heap, ROM, Sulfuros de baja ley. Eficiencia y Densidad de corriente Nave EW. Tecnologías calentamiento electrolito (Caldera, Solar ,etc.)

Consideraciones:

- Para el IDE Total Planta, el consumo total de electricidad debe definir un alcance común de equipos/subprocesos a considerar: Plantas de Beneficio, correas, aglomerado, Apilado, Bombeo soluciones de lixiviación, disposición de ripios, SX, EW, otros servicios como por ejemplo aire comprimido.
- Para efectos de análisis de IDE entre distintas compañías, se sugiere incorporar como variable de comparación a el tamaño de Planta, de manera adicional a las variables de complemento indicadas.

IDE desarrollados por la Red

❑ Fundiciones

Subproceso	IDEn Sugerido	Unida Base sugerida	Unidad Energética sugerida	Frecuencia de cálculo	Variables que podrían condicionar la evolución del indicador
Fundición Energía Eléctrica	$\frac{\text{Consumo Energía Eléctrica Fundición}}{\text{Tonelada Concentrado Procesado}}$	kWh/kton	GJ/kton	Mensual	
Fundición Combustible	$\frac{\text{Total Energía Combustibles Fundición}}{\text{Tonelada Concentrado Procesado}}$	GJ/kton	GJ/kton	Mensual	<ul style="list-style-type: none">• Características origen del concentrado de cobre (composición mineralógica, impurezas)• Tecnologías de Secado, Conversión y Fusión utilizadas.• Tipos de combustibles usados
Total Fundición	$\frac{\text{Energía Electricidad + Combustible}}{\text{Tonelada Concentrado Procesado}}$	GJ/kton	GJ/kton	Mensual	

Consideraciones:

- Los procesos a considerar para contabilización de consumos de energía en Fundición son: Secado, Conversión, Fusión, Refino, Moldeo, Planta Tratamiento de Gases, Planta de ácido; Planta de Oxígeno e Instalaciones de suministro de agua. Se excluyen del límite de batería el proceso de Electro-refinería.

IDE desarrollados por la Red

Plantas de Tratamiento de Sales

Plantas Secas

Subproceso	IDEn Sugerido	Unida Base sugerida	Unidad Energética sugerida	Frecuencia de cálculo	Variables que podrían condicionar la evolución del indicador
Plantas secas	$\frac{\text{Consumo Energía Electrica Plantas Secas}}{\text{Alimentación Plantas Secas}}$	kWh/m^3	GJ/m^3	Mensual	S/I
Plantas secas	$\frac{\text{Energía Combustible Plantas Secas (Diésel + GLP)}}{\text{Alimentación Plantas Secas}}$	GJ/m^3	GJ/m^3	Mensual	S/I
Plantas secas	$\frac{\text{Consumo Energía Electrica Plantas Secas}}{\text{Producción Plantas Secas}}$	$kWh/kton$	$GJ/kton$	Mensual	S/I
Plantas secas	$\frac{\text{Energía Combustible Plantas Secas (Diésel + GLP)}}{\text{Producción Plantas Secas}}$	$GJ/kton$	$GJ/kton$	Mensual	S/I

IDE desarrollados por la Red

□ Plantas de Tratamiento de Sales

Plantas Hidróxido de Litio

Subproceso	IDEn Sugerido	Unida Base sugerida	Unidad Energética sugerida	Frecuencia de cálculo	Variables que podrían condicionar la evolución del indicador
Plantas Hidróxido Li	$\frac{\text{Consumo Energía Electrica Plantas LiOH}}{\text{AlimentaciónPlantas LiOH}}$	kWh/m^3	GJ/m^3	Mensual	<ul style="list-style-type: none">• Ley de Litio• Ley de Potasio• % contaminantes presentes
Plantas Hidróxido Li	$\frac{\text{Energía Combustible Plantas Li}_2\text{CO}_3}{\text{(Diésel + GNL)}} \frac{\text{AlimentaciónPlantasLiOH}}$	GJ/m^3	GJ/m^3	Mensual	<ul style="list-style-type: none">• Ley de Litio• Ley de Potasio• % contaminantes presentes
Plantas Hidróxido Li	$\frac{\text{Consumo Energía Electrica Plantas LiOH}}{\text{Producció Plantas LiOH}}$	$kWh/kton$	$GJ/kton$	Mensual	<ul style="list-style-type: none">• Ley de Litio• Ley de Potasio• % contaminantes presentes
Plantas Hidróxido Li	$\frac{\text{Energía Combustible Plantas Li}_2\text{CO}_3}{\text{(Diésel + GNL)}} \frac{\text{Producción PlantasLiOH}}$	$GJ/kton$	$GJ/kton$	Mensual	<ul style="list-style-type: none">• Ley de Litio• Ley de Potasio• % contaminantes presentes

IDE desarrollados por la Red

Plantas de Tratamiento de Sales

Plantas Carbonato de Litio

Subproceso	IDEn Sugerido	Unida Base sugerida	Unidad Energética sugerida	Frecuencia de cálculo	Variables que podrían condicionar la evolución del indicador
Plantas Carbonato Li	$\frac{\text{Consumo Energía Electrica Plantas Li}_2\text{CO}_3}{\text{AlimentaciónPlantas Li}_2\text{CO}_3}$	kWh/m^3	GJ/m^3	Mensual	<ul style="list-style-type: none">• Ley de Litio• % contaminantes presentes
Plantas Carbonato Li	$\frac{\text{Energía Combustible Plantas Li}_2\text{CO}_3 \text{ (Diésel + GLP + GNL)}}{\text{AlimentaciónPlantas Li}_2\text{CO}_3}$	GJ/m^3	GJ/m^3	Mensual	<ul style="list-style-type: none">• Ley de Litio• % contaminantes presentes
Plantas Carbonato Li	$\frac{\text{Consumo Energía Electrica Plantas Li}_2\text{CO}_3}{\text{ProducciónPlantas Li}_2\text{CO}_3}$	$kWh/kton$	$GJ/kton$	Mensual	<ul style="list-style-type: none">• Ley de Litio• % contaminantes presentes
Plantas Carbonato Li	$\frac{\text{Energía Combustible Plantas Li}_2\text{CO}_3 \text{ (Diésel + GLP + GNL)}}{\text{ProducciónPlantas Li}_2\text{CO}_3}$	$GJ/kton$	$GJ/kton$	Mensual	<ul style="list-style-type: none">• Ley de Litio• % contaminantes presentes

IDE desarrollados por la Red

Plantas desaladoras e impulsión de agua

Subproceso	IDEn Sugerido	Unida Base sugerida	Unidad Energética sugerida	Frecuencia de cálculo	Variables que podrían condicionar la evolución del indicador
Suministro Agua	$\frac{\text{Energía Electrica suministro Agua}}{\text{Total agua impulsada}}$	KWh/m ³ agua	GJ/m ³ agua	Mensual	<ul style="list-style-type: none">• Fuentes de suministro de agua: mar, pozo, río, etc.• Distancia (km) y diferencia de altura (msnm) de la línea entre puntos de impulsión y destino.• Condiciones de estacionalidad del suministro: Por ejemplo, año seco, lluvioso, etc.• Tecnología tratamiento agua: Planta desaladora, Planta Osmosis, otra

Consideraciones:

- El consumo de Energía eléctrica del suministro de agua debe definir un alcance común de equipos/subprocesos a considerar: Plantas Desaladoras, Plantas de Osmosis, Estaciones de Bombeo, etc.
- Se sugiere independizar del análisis de este indicador, consumos de energía asociados a etapas de recuperación de agua en Plantas concentradoras.
- Para efectos de análisis de IDE entre distintas compañías, se sugiere incorporar como variable de comparación la tecnología y equipos usados, rangos de distancias y alturas geográficas entre punto de suministro y destino y las diferencias de fuentes de suministro.



5. Conclusiones

5. Conclusiones trabajo desarrollado sobre IDE

- Existen distintos niveles de IDE, muchas veces asociados al público objetivo o uso que se le dará.
- Los IDE asociados a reportabilidad externa, generalmente no permiten desarrollar gestión energética, imposibilitando su uso para la generación de líneas base o mejoras operacionales.
- Para el desarrollo de mejoras operacionales, se recomienda el desarrollo de IDE específicos de procesos energointensivos.
- Las variables que componen los IDE específicos pueden determinar su uso o ajustes necesarios dependiendo de la variabilidad de los procesos mineros.
- Los IDE específicos, pueden o no ser representativos entre compañías mineras, esto debido a la variabilidad de las operaciones y las condiciones particulares del mineral y su forma de procesamiento.

5. Conclusiones trabajo desarrollado sobre IDE

- Dada la existencia de variables que podrían condicionar la evolución de los IDE, se recomienda que las compañías puedan usar como fuente principal de comparación la evolución de sus propios IDE en el tiempo. Si se quiere realizar una comparación entre compañías, debe considerarse posibles ajustes que hagan comparables los valores.
- Los IDE deben ser evaluados anualmente para asegurar su representatividad del proceso, pudiéndose requerir ajustes en las variables que lo componen, con el objetivo de asegurar un correcto monitoreo de la gestión energética del proceso.
- Se aconseja que las compañías mineras de la Red continúen trabajando en la construcción de IDE específicos, elaborados directamente con los equipos de operaciones.
- Los IDE que se presentan en este documento permiten avanzar hacia un mejor conocimiento por parte del ecosistema minero, respecto de los distintos procesos y el uso de la energía, asegurando que estos IDE fueron generados desde la experiencia en el uso y gestión de la energía de las propias compañías mineras.