



**UNIVERSIDAD DE TALCA**  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL DE MINAS

COMPARATIVA TÉCNICA, ECONÓMICA, INNOVATIVA Y  
AMBIENTAL DE EQUIPOS LHD EN MINERÍA SUBTERRANEA

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO  
DE INGENIERO(A) CIVIL DE MINAS**

**GIANCARLO PAOLO QUITRAL DIAZ**

PROFESOR GUÍA

Dr. Manuel Reyes Jara

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

Mg. Francisco Rivas Saldaña

Dr (c). Carlos Moraga Cruz

**CURICÓ - CHILE**

2022

## CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



UNIVERSIDAD DE TALCA  
DIRECCIÓN  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD DE TALCA  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS  
CAMPUS CURICO

Curicó, 2022

## Resumen

La minería es una de las industrias de mayor movimiento de terreno, dinero, operadores y equipo. Pese a la dinámica de la industria, los equipos y formatos tienden a evolucionar lentamente pensando en aumentar la eficiencia del proceso o añadiendo funciones complementarias; pero en la actualidad se ha iniciado la revolución de las tecnologías productivas y ambientalmente responsable. En este punto se concibió el trabajo realizado; exponiendo las características positivas, negativa, fortalezas y debilidades en diferentes ámbitos de los LHD híbrido, eléctrico y tradicional. Donde se analizaron cosas tal como el contexto socio político, incentivos gubernamentales o privados, prioridades nacionales, capacidades técnicas, factores económicos y el grado de innovación de cada uno de estos equipos en contraste con el resto. De esta investigación se logró visualizar los problemas que conlleva el mantener los equipos diésel como línea base de extracción, dado que los costos de combustible están siendo mayores, las profundidades de trabajo están aumentando y con las emisiones de estos equipos se debe invertir aún más en los sistemas de ventilación. En tanto, los equipos eléctricos presentan características operativas básicas similares o mejores a los equipos tradicionales, pero con nuevas limitantes, dichas limitantes son inherentes a su alimentación, dado que existen los equipos con cables de máximo 300 m de largo o a batería, los cuales su duración está directamente limitada por su uso, por lo que no es fácil seguir una rutina de trabajo, dado que el momento de recarga de la batería tiene una incertidumbre alta. En tanto, los LHD híbridos presentaban características favorables de ambos mundos, dado que el motor diésel existente dentro del equipo al ser usado como generador, es de menor tamaño por lo que no genera grandes emisiones en comparación al tradicional y obtiene la independencia de estos, además de tener un tiempo de uso en base a combustible más estable; junto con esto, se presentan sistemas de aprovechamiento energético con el cual el rendimiento del motor diésel consumirá menos combustible para generar energía para los motores eléctricos. En tanto, las otras perspectivas de análisis sacan a relucir el futuro que les esperan a los equipos eléctricos, pues existe mucho interés en seguir desarrollando y mejorando esta tecnología por motivos ambientales, de nueva conciencia social y por requerimientos técnicos de las nuevas profundidades y condiciones de trabajo, donde pueden ser fácilmente llevados a equipos de control remoto.

## **Abstract**

Mining is one of the industries with the largest movement of land, money, operators and equipment. Despite the dynamics of the industry, the equipment and formats tend to evolve slowly, thinking of increasing the efficiency of the process or adding complementary functions; but at present the revolution of productive and environmentally responsible technologies has begun. At this point the work carried out was conceived; exposing the positive and negative characteristics, strengths and weaknesses in different areas of the hybrid, electric and traditional LHD. Where things such as the socio-political context, government or private incentives, national priorities, technical capabilities, economic factors and the degree of innovation of each of these teams in contrast to the rest were analyzed. From this research it was possible to visualize the problems involved in maintaining diesel equipment as an extraction baseline, given that fuel costs are being higher, working depths are increasing and with the emissions of these equipment it is necessary to invest even more in ventilation systems. Meanwhile, electrical equipment has basic operating characteristics similar to or better than traditional equipment, but with new limitations. Said limitations are inherent in its power supply, since there is equipment with cables of a maximum length of 300 m or battery-powered, which Duration is directly limited by its use, so it is not easy to follow a work routine, since the moment of recharging the battery has a high uncertainty. Meanwhile, the hybrid LHDs presented favorable characteristics of both worlds, given that the existing diesel engine within the equipment, when used as a generator, is smaller, so it does not generate large emissions compared to the traditional one and obtains the independence of these, in addition to having a more stable fuel-based usage time; Along with this, energy use systems will be presented with which the performance of the diesel engine will consume less fuel to generate energy for the electric motors. Meanwhile, the other perspectives of analysis bring to light the future that awaits electrical equipment, as there is much interest in continuing to develop and improve this technology for environmental reasons, new social awareness and technical requirements of new depths and conditions. of work, where they can be easily taken to remote control equipment.

# Índice

1. Introducción.....	2
1.1. Antecedentes y motivaciones.....	2
1.2. Descripción del problema.....	3
2. Objetivos y alcances.....	2
2.1. Objetivo General .....	2
2.2. Objetivos específicos .....	2
2.3. Alcances.....	2
3. Marco Teórico .....	4
3.1. Funcionamiento motor combustión .....	4
3.2. Funcionamiento motor hibrido.....	4
3.3. Funcionamiento motor eléctrico .....	5
3.4. Método de explotación .....	6
3.5. Métodos de explotación subterránea .....	7
3.6. Métodos de hundimiento .....	7
3.7. Métodos de obtención por tronadura directa (mecánico) .....	8
3.7.1. Desarrollo .....	8
3.7.2. KPI's Equipos mineros.....	10
3.8. Descripción equipo hibrido .....	11
3.8.1. Funcionamiento .....	11
3.8.2. Puesta en marcha.....	12
3.8.3. Aceleración.....	14
3.8.4. Principales sistemas equipo hibrido.....	15

3.9.	Descripción equipo Tradicional .....	17
3.10.	Descripción equipo eléctrico .....	20
3.11.	Ventilación en minería subterránea .....	27
4.	Metodología .....	32
4.1.	Recopilación de información complementaria .....	32
4.2.	Análisis de contextos .....	32
4.3.	Comprensión Técnica .....	33
4.4.	Nivel innovativo y tecnológico .....	33
4.5.	Análisis económico .....	33
5.	Análisis de resultados .....	35
5.1.	Contextos de comparación.....	35
5.2.	Características técnicas distintivas .....	36
A.	Caterpillar.....	36
B.	Komatsu.....	39
C.	Epiroc .....	42
D.	SANDVIK.....	45
5.3.	Comparación de innovación y tecnología.....	49
5.4.	Contraste de factor económicos.....	50
6.	Conclusiones.....	54
7.	Referencias .....	57
8.	Anexo.....	63

## Índice de Tablas

Tabla 1: Modelos de Caterpillar con capacidades cercanas a los tonelajes 10, 18 y 20 .....	36
--------------------------------------------------------------------------------------------	----

Tabla 2: Características general para los modelos seleccionados de Caterpillar ....	37
Tabla 3: Características de emisiones y consumo de motores diésel CAT .....	37
Tabla 4: Horas de funcionamiento continuo por combustible LHD CAT.....	38
Tabla 5: Inyección de aire y extracción de gases necesario por LHD CAT seleccionado .....	38
Tabla 6: Modelos de Komatsu con capacidades cercanas a los tonelajes 10, 18 y 20 .....	39
Tabla 7: Características general para los modelos seleccionados de Komatsu.....	40
Tabla 8: Características de emisiones y consumo de motores diésel Komatsu .....	40
Tabla 9: Horas de funcionamiento continuo por combustible LHD Komatsu.....	41
Tabla 10: Inyección de aire y extracción de gases necesario por LHD Komatsu seleccionado .....	41
Tabla 11: Modelos de Epiroc con capacidades cercanas a los tonelajes 10, 18 y 20 .....	42
Tabla 12: Características general para los modelos seleccionados de Epiroc.....	43
Tabla 13: Características de emisiones y consumo de motores diésel Epiroc.....	43
Tabla 14: Horas de funcionamiento según combustible de equipos Epiroc seleccionados.....	44
Tabla 15: Inyección de aire y extracción de gases necesario por LHD Epiroc seleccionado .....	44
Tabla 16: Modelos de SANDVIK con capacidades cercanas a los tonelajes 10, 18 y 20 .....	46
Tabla 17: Características general para los modelos seleccionados de SANDVIK ...	46
Tabla 18: Características de emisiones y consumo de motores diésel Sandvik .....	47
Tabla 19: Horas de funcionamiento según combustible y volúmenes de aire necesarios de ingresar o extraer de equipos Sandvik seleccionados .....	48

## Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Representación niveles de método panel caving (Fernandez, 2019). ..	9
Ilustración 2: LHD Diésel Híbrido 18HD (Komatsu Mining Corp., 2019).....	11
Ilustración 3: Principales sistemas equipo diésel híbrido (Rojas, 2017). .....	12
Ilustración 4: Diagrama de proceso del funcionamiento del equipo y tipos de energías involucradas (Rojas, 2017).....	13
Ilustración 5: Motor SR Rotor y Estator (Rojas, 2017).....	16
Ilustración 6: Unidad KESS (Rojas, 2017).....	16
Ilustración 7: Imagen LHD Komatsu – JoyGlobal LT- 1050 (Komatsu - JoyGlobal, 2021) .....	17
Ilustración 8: Esquema de motor diésel .....	18
Ilustración 9: Esquema de Tren de Impulsión LHD (Ferreyros S.A.A., 2011)  .....	19
Ilustración 10: Esquema del sistema de frenado LHD R1600G (Ferreyros S.A.A., 2011) .....	20
Ilustración 11: Imagen LHD modelo EST1030 de Epiroc (Epiroc, 2021b).....	21
Ilustración 12: Imagen de LHD modelo LH625IE de SANDVIK (SANDVIK, 2021f)..	21
Ilustración 13: Imagen LHD modelo LH518B de SANDVIK (SANDVIK, 2021d).....	22
Ilustración 14: Imagen LHD modelo Scrooptram ST7 de Epiroc (Epiroc, 2018).....	22
Ilustración 15: Imagen LHD modelo LH518B de SANDIVK, con batería desmontada y en estación de recarga (SANDVIK, 2021d) .....	23
Ilustración 16: Esquema componentes y estructura general de motor eléctrico (Dartel - SIEMENS, S.F.) .....	24
Ilustración 17: Esquema de tren de movimiento para LHD eléctrico SANDVIK (Sánchez, 2006) .....	25



Ilustración 18: Esquema Sistema de propulsión para tren de movimiento LHD eléctrico SANDVIK (Sánchez, 2006) .....	25
Ilustración 19: Esquema de frenado de LHD eléctrico SANDVIK (Sánchez, 2006).	27
Ilustración 20: Emisiones garantizados de gases para el motor CAT C11(Barloworld Finanzauto CAT, 2021a) .....	38
Ilustración 21: Emisiones garantizados de gases para el motor CAT C15 y ACERT C15 (Barloworld Finanzauto CAT, 2021b).....	39
Ilustración 22: Ilustración emisiones QSL9G (Cummins Inc., 2015).....	42
Ilustración 23: Ilustración de emisiones motores US tier IV final/EU stage IV (Emission Standards EU: Nonroad Engines, 2016) .....	42
Ilustración 24: Ilustración de emisiones motores EPA Tier 2 (United States : Cars and Light-Duty Trucks : Tier 2, 2022) .....	45
Ilustración 25: Tabla de emisiones EU II del motor Deutz F12L413 FW, Volvo TAD1342VE y TAD1344VE (Emission Standards EU: Nonroad Engines, 2016) ....	48

## Índice de Ecuaciones

Ecuación 1: Calculo de revoluciones por minuto (RPM) para motores eléctricos trifásicos (Dartel - SIEMENS, n.d.) .....	26
Ecuación 2: Calculo de caudal de aire fresco por equipo con motor diésel (Gallardo, 2008) .....	28

# Capítulo 1

## Introducción

# 1. Introducción

## 1.1. Antecedentes y motivaciones

La minería es un negocio conformado por múltiples partes, que no se ciñen netamente a elementos metálicos y no metálicos; sino que también contempla la extracción misma, equipos utilizados, profesionales y servicios, por nombrar algunos; así mismo, pueden verse las problemáticas o puntos de mejora en cada una de estas partes, como puede entenderse de De Solminihac & Daga (2018) y Herrera (2020).

Con esto en mente, se da la oportunidad que no solo se observen estas partes y variables desde una perspectiva del proceso u optimización misma, sino que de intereses adyacentes a la minería, tales como son el medio ambiente, tal como lo han expresado un conjunto de empresas y corporación al formar una organización y pacto llamado “Compromiso minero”, donde dan metan a las cuales llegar en los avances de la minería, incluyendo uno de los más relevantes en la actualidad, el medio ambiente (Compromiso minero, 2021).

Basado en lo anterior, se enmarca en la minería subterránea, en donde el objetivo es estudiar el comportamiento que poseen las distintas alternativas de equipos LHD; donde existen los eléctricos con cable, eléctricos a batería, tradicionales (diésel) y el más reciente, el LHD híbrido.

## 1.2. Descripción del problema

En la minería es de vital importancia cumplir la meta de producción, además de minimizar los costos de producción y cumplir con los estándares medioambientales. Por ende, nace la necesidad de buscar en nuevas tecnologías las soluciones a problemáticas actuales, siendo la tecnología híbrida o eléctricas una gran alternativa a la tecnología diésel actual.

Además, el mercado tecnológico minero y las necesidades actuales de la industria estarías siendo satisfechas en múltiples aspectos; lo que en un futuro cercano implicara un mayor requerimiento de estos tipos de equipos (Rojas, 2017). Esto remarca la necesidad de estudiar, la interacción de diversas maquinarias con la flota ya existente o una compuesta únicamente por equipos de cada tipo, para contemplar casos como la renovación de flota o cambio generacional de tecnologías.

Junto con lo anterior, cabe mencionar que la etapa de carguío y transporte de mineral es de gran importancia para las posteriores etapas hasta el producto final. Por ello es imprescindible lograr una buena utilización de los recursos y equipos dentro de esta etapa, con ellos se busca aportar a la meta final de producción y también aportar en otras áreas como el mantenimiento de equipos debido a que esta tecnología híbrida reduce la cantidad de piezas y el desgaste de estas, pero junto con el LHD eléctrico, aumentan la necesidad de otro mantenedor con un alto nivel de especialización en mantenimiento mecánico y sistemas eléctricos.

Además, el alza en el precio de los combustibles junto con el impacto generado por las emisiones de gases presentes en el funcionamiento de motores diésel y el gran impacto de estos en operación subterráneas llevan a plantearse la opción de utilizar equipos eléctricos o híbridos en vez del tradicional equipo diésel, siendo la opción eléctrica la más incentivada a nivel nacional e internacional siendo en temas de valor \$880 el litro de diésel y \$113.29 el kilo watt hora (promedio nacional chileno marzo 2020) donde los equipos consumen sobre diésel consumen en promedio sobre los 80 lts/h y los eléctricos sobre los 200kWh.

Considerando esto, es que se deben hacer múltiples comparaciones ocupando diversos casos posibles y enfoques, que fundamenten la implementación de dichos equipos. El contraste de equipos es necesario para ratificar y generar un nivel de certeza que de confianza del uso de distintos conjuntos de equipos LHD, exponiendo fortalezas y debilidades y junto con ello aportar a un ambiente laboral más adecuado para los trabajadores y reducir el impacto ambiente de la minería en el mundo.

# Capítulo 2

## Objetivos

## 2. Objetivos y alcances

### 2.1. Objetivo General

Realizar una comparativa técnica, económica, innovativa y ambiental del LHD híbrido, el eléctricos y el tradicionales.

### 2.2. Objetivos específicos

- Reunir bibliografía técnica, económica, ambiental y tecnológica a nivel académico y de mercado sobre los tres tipos de LHD
- Identificar variables comunes entre los tipos de LHD para su comparación
- Analizar la razón de las variables no comparables entre los tipos de LHD
- Analizar contextualmente de forma teórica el comportamiento de cada LHD

### 2.3. Alcances

- La investigación recopilara información netamente publica
- No se realizan comparativas con datos de campo
- Para un análisis económico se usarán estadísticas y porcentaje, no valores económicos

# **Capítulo 3**

## **Marco Teórico**



### 3. Marco Teórico

Hoy en día, la industria automotriz se encuentra a la vanguardia en lo relacionado con el uso de energías sustentables para el accionar del vehículo, dentro de las tecnologías más conocidas y probadas para el accionar de los motores de estos vehículos se encuentran:

#### 3.1. Funcionamiento motor combustión

El combustible diésel se inyecta en los cilindros de estos motores mediante inyectores; allí fue quemado con aire comprimido a una temperatura cercana a los 900° C; la mezcla de aire y diésel provoca una explosión progresiva que empujaba los pistones y hacía girar el cigüeñal; este elemento alterna el movimiento de la transmisión, haciendo que el vehículo se mueva; luego, la válvula de escape se abrirá para liberar los gases de escape del proceso de combustión; este es un proceso que tiene lugar en segundos y se repite en todo el motor; por otra parte, el motor de gasolina funciona por el accionar de una bujía la cual difiere del accionar del motor diésel el cual es debido a su ratio de compresión lo cual genera la temperatura necesaria para la combustión. Ambos motores comparten los 4 tiempos de funcionamiento de cada cilindro los cuales son; admisión, compresión, explosión y escape (Derco Center, 2022; Martín, 2019).

#### 3.2. Funcionamiento motor híbrido

En pocas palabras, un híbrido combina al menos un motor eléctrico con un motor de gasolina para impulsar el vehículo, con un sistema que recupera energía a través del frenado regenerativo. A veces, el motor eléctrico hace todo el trabajo, otras veces, el motor de gasolina hace todo el trabajo en conjunto. Con todo esto en mente, la electricidad que proviene de una batería de alto voltaje (que es diferente de una batería de automóvil típica de 12 voltios) se recarga capturando la energía de frenado que normalmente se perdería en el calor generado por los frenos de un automóvil. Esto es gracias al sistema de frenado regenerativo. Los vehículos híbridos también usan motores de gasolina para cargar y mantener la

batería. Las compañías automotrices usan diferentes diseños híbridos para lograr una variedad de tareas, desde la máxima economía de combustible hasta los costos de vehículo más bajos posibles. Existen 4 tipos de vehículos híbridos (DIGITAL TRENDS, 2021):

- Híbrido en paralelo: ambos motores (combustión y eléctrico) funcionan en conjunto para entrenar energía a una transmisión en común. Normalmente, esta combinación puede funcionar solo con el motor eléctrico, pero a bajas velocidades.
- Híbrido en serie: el motor eléctrico es el encargado de proporcionar el empuje al vehículo y el motor a combustión es el encargado de recargar las baterías.
- Híbrido enchufable: proporciona una batería más grande que le híbrido convencional la cual debe recargarse con una fuente externa. Al agotar su autonomía eléctrica se vuelve un híbrido en paralelo, es decir, utiliza el motor a combustión para continuar su recorrido.
- Híbrido suave: funciona al igual que un motor en paralelo, sin embargo, el motor eléctrico funciona solamente para asistir al motor a combustión entregando energía recuperada del frenado y así alimentar las baterías.

### 3.3. Funcionamiento motor eléctrico

Los vehículos eléctricos funcionan con electricidad proporcionada por baterías recargables. A diferencia de los vehículos convencionales, utilizan cajas de cambios de una sola velocidad porque sus motores pueden generar un par máximo a velocidades extremadamente altas.

A diferencia de los vehículos con motor de combustión interna que funcionan con combustibles fósiles, los vehículos eléctricos o totalmente eléctricos funcionan únicamente con electricidad almacenada en baterías para impulsar las ruedas; debido a que los motores eléctricos pueden producir un par máximo a velocidades extremadamente bajas, los vehículos eléctricos utilizan una transmisión de una sola velocidad, mientras que los automóviles convencionales requieren múltiples

velocidades (*¿Cómo Funcionan Los Autos Eléctricos? | Kia Motors Costa Rica, 2017*).

Las baterías presentes en todas estas combinaciones son principalmente baterías de ion-litio las cuales poseen ciertas características para ser una mejor mucho más viable que las anteriores baterías de níquel-cadmio. Algunas de estas características son: reducción de peso y pérdida de carga muy pequeña.

Para el funcionamiento de la batería iniciamos en que la celda tiene una energía almacenada en forma química; esta energía corresponde a las cargas que poseen los iones de la solución que hemos denominado electrolito; dicha energía se transforma en energía eléctrica a raíz de una reacción química de oxidación-reducción (REDOX) la cual tiene lugar entre los electrodos; el ánodo, es susceptible a cargarse positivamente y tener la capacidad de atraer cargas negativas, es decir, iones negativos o aniones; de igual forma el cátodo es capaz de cargarse negativamente y así atraer iones positivos o cationes, de ahí el nombre del electrodo; es necesario un material que proporcione los iones que permitan cargarse a los electrodos, de aquí la función del electrolito; finalmente, al conectar las baterías a una fuente de alimentación se producirá la separación de iones que se hallan en el electrolito, los cuales se transferirán entre los electrodos como producto de la reacción de oxidación-reducción, fenómeno denominado como transferencia de carga (Morente, 2015).

Actualmente la minería se podría comprender como la extracción u obtención de recursos metálicos o no metálicos, ya sea de depósitos naturales o artificiales a través de distintos procesos, los cuales se denominan métodos de explotación.

### 3.4. Método de explotación

El método de explotación es la estrategia global que permite la excavación y extracción de un cuerpo mineralizado del modo técnico y económico más eficiente. Aunque los métodos de explotación ya están definidos, cabe destacar que cada uno de ellos se diferencia en las particularidades provenientes de las

características propias de cada tipo de yacimiento a explotar. Entre ellas podemos mencionar: composición mineralógica, características geotécnicas, características espaciales, etc.

### 3.5. Métodos de explotación subterránea

Los métodos de explotación subterránea se distinguen entre si principalmente por el tratamiento que hagan de la cavidad que deja la propia extracción del mineral. Sin embargo, en la práctica se requiere de la combinación de métodos debido a que los depósitos raramente se ajustan exactamente a las características ideales de aplicación de algunos de los métodos.

Las cavidades generadas por el mineral extraído en un método de hundimiento son rellenas con el material superpuesto (mineral, mientras dura la explotación, y estéril, una vez finalizada). Los métodos de hundimiento más conocidos son:

- Sublevel Caving
- Block / Panel Caving
- Room and Pilar
- Cut and fill
- Shrinkage

### 3.6. Métodos de hundimiento

El método de hundimiento Block / Panel Caving se aplica en yacimientos masivos de grandes dimensiones, por ejemplo, los depósitos minerales diseminados conocidos con el nombre de cobres porfídicos, los cuales tienen una gran importancia en nuestro país. Otra posible aplicación son los yacimientos de forma tabular de gran espesor.

Este método está basado en el principio de hundimiento y quiebre de mineral debido a la remoción de un área de soporte base del bloque lo suficientemente grande y la posterior extracción de este a través de un sistema de embudos o zanjias recolectoras. El vacío provocado por la extracción de este material es rellenado por la caída de material debido a la acción de la gravedad, lo cual

sumando al proceso de atricción dado por el roce durante el descenso define el tamaño del mineral en el punto de extracción.

El método de explotación en el cual se basa este estudio es el Panel Caving el cual tiene componentes y estructura común a su contraparte Block Caving, mientras que sus diferencias son las siguientes:

Block Caving: Método de explotación por hundimiento en que la incorporación de nuevas áreas a producción es discreta, es decir, se hace por medio de bloques. Este método está definido para extracción de mineral secundario, el cual tiene la característica de fragmentarse en granulometrías de tamaño fino a medio.

Panel Caving: Método de explotación por hundimiento en que la incorporación de nuevas áreas a producción es continua, mediante paneles. Este método está definido para extracción de mineral primario, del que se obtienen fragmentos de granulometría gruesa.

### 3.7. Métodos de obtención por tronadura directa (mecánico)

- Sublevel Caving
- Room and Pilar
- Cut and fill

#### 3.7.1. Desarrollo

Para el método Panel Caving se distinguen distintos niveles los cuales se muestran en la ilustración 1, estos se describen como:

Nivel producción: grupo de galerías paralelas las cuales están espaciadas entre 15 a 30 m, en ellas se realiza la operación de extracción del

mineral según diversas modalidades. Incluye las correspondientes galerías de acceso.

Nivel de hundimiento: grupo de galerías espaciadas entre 15 a 30 m donde se realiza la socavación o corte basal de la columna mineralizada. Se encuentra en una cota entre 7 a 20 m sobre el nivel de producción.

Punto de extracción: es la ubicación donde se produce el carguío del mineral quebrado, mediante equipos LHD, este mineral quebrado cae por el conducto denominado batea, la cual conecta el nivel de producción con el nivel de hundimiento.

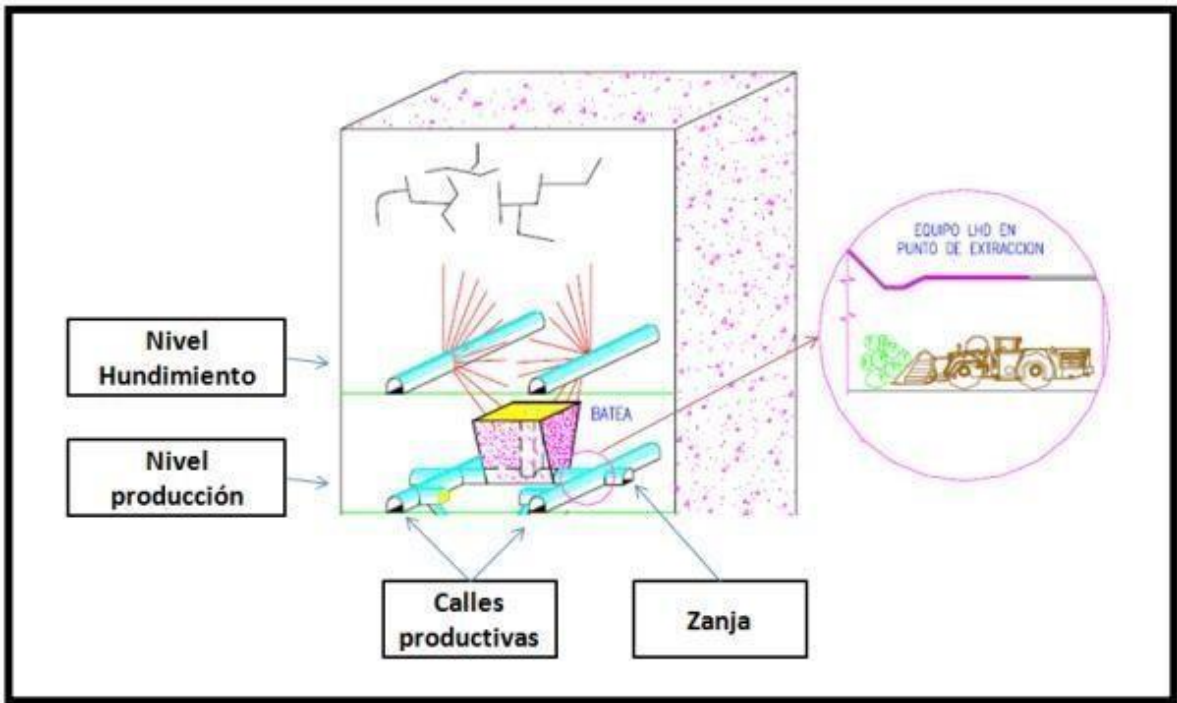


Ilustración 1: Representación niveles de método panel caving (Fernandez, 2019).

Zanjas recolectoras o estocadas de carguío: Es por donde el LHD accede a remover el material quebrado, el cual cae por la batea y se proyecta con un Angulo hacia la zanja.

Piques de traspaso: Son perforaciones verticales o inclinadas que conectan el nivel de producción con el nivel de traspaso.

Nivel de transporte: Conjunto de galerías espaciadas entre 60 a 120 m, donde llega el mineral desde el nivel de producción. En ella se carga por intermedio de buzones a un sistema de transporte que lo conduce a la planta de chancado.

Subnivel de ventilación: Conjunto de galerías paralelas espaciadas entre 60 a 120 m, se encuentran en una cota entre 15 a 30 m bajo el nivel de producción. Este subnivel incluye las chimeneas por donde se inyecta o se extrae el aire hacia y desde el nivel de producción respectivamente.

Subnivel de control y/o reducción: Puede ser o no necesario, dependiendo de la geometría del cuerpo mineralizado y de las características de la roca.

### 3.7.2. KPI's Equipos mineros

Los indicadores claves de rendimiento o *Key Performance Index*. Los KPI's se pueden utilizar para comprender el comportamiento de un equipo tal como lo es el LHD, donde dependiendo de los intereses y perspectiva de aquel que realiza la búsqueda de mejora o comprensión de funcionamiento del equipo o procesos.

Esto puede comprenderse más fácilmente al observar las declaraciones de KPI's que estudia Carrasco (2016), las cuales contemplan tiempos del proceso productivo, requerimiento de operadores de equipos LHD y datos que influyen en la productividad; lo cual va en pos de su objetivo a investigar, el cual es determinar una asignación dinámica de operadores de LHD para cierta operación.

En tanto, Salas (2013) tiene el objetivo de realizar un estudio analítico de los KPI's de perforadoras con kits de LHD para poder incrementar la producción; con esta propuesta es que se establecieron que los indicadores relevantes a observar son estados del equipo (utilización efectiva y disponibilidad mecánica), junto a datos productivos en base al tiempo (rendimiento operativo y efectivo).

Por ende, se contempla que para realizar una eficaz comparación entre los equipos LHD, es importante incluir los efectos de KPI's que puedan contrastarse de forma teórica o por datos investigados.

### 3.8. Descripción equipo híbrido

En este estudio se utilizará el equipo JOY 18HD el cual fue diseñado por Joy Global, a través de su marca de minería subterránea denominada JOY. Este equipo recibe su nombre diésel híbrido debido a su sistema de accionamiento Joy Sr Hybrid Drive, el cual consta de un motor diésel, cuatro motores eléctricos (uno en cada rueda), un generador SR y un sistema de almacenamiento de energía (KESSE por sus siglas en inglés).



Ilustración 2: LHD Diésel Híbrido 18HD (Komatsu Mining Corp., 2019).

#### 3.8.1. Funcionamiento

Los principales sistemas que tiene relación con el funcionamiento del equipo son:

- Motor Diésel
- Generador
- Motores SR
- Sistema de control



- Panel de conversión
- Parrilla de frenado
- Unidad de almacenamiento de energía.

La ilustración 3 muestra la distribución espacial de los principales componentes de este.

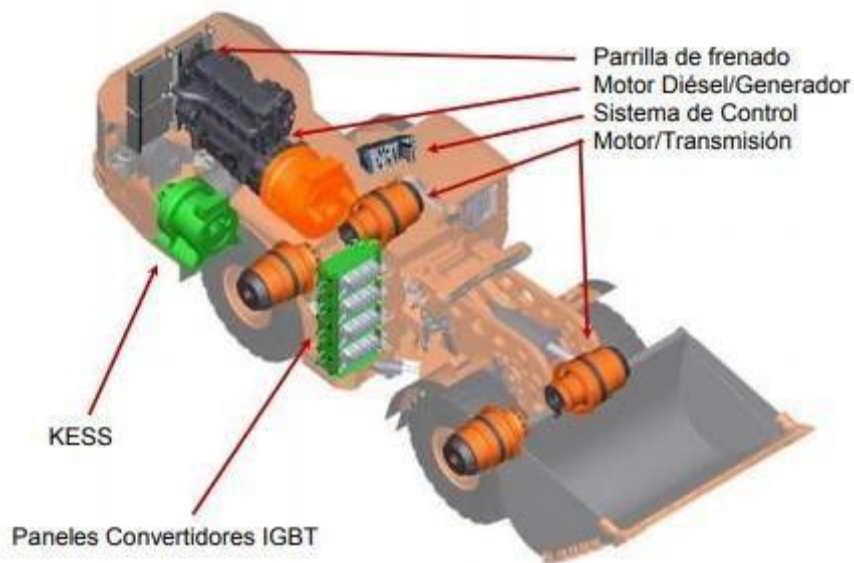


Ilustración 3: Principales sistemas equipo diésel híbrido (Rojas, 2017).

### 3.8.2. Puesta en marcha

Una de las ventajas más importantes en este equipo es la posibilidad de recuperar y reutilizar energía debido al sistema de accionamiento híbrido, a través

del frenado. Para que esto sea posible además de verificar que los flujos de energía fluyan eficientemente es que el equipo utiliza el sistema de control Joy SR Hybrid Drive, el cual basa su funcionamiento en el control de acciones de computación de los paneles IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor).

La ilustración 4 muestra los distintos tipos de energías en cada subsistema del sistema de accionamiento, donde las líneas de color verde representan energía hidráulica, la de color roja es energía mecánica y las restantes de color celeste representan energía eléctrica.

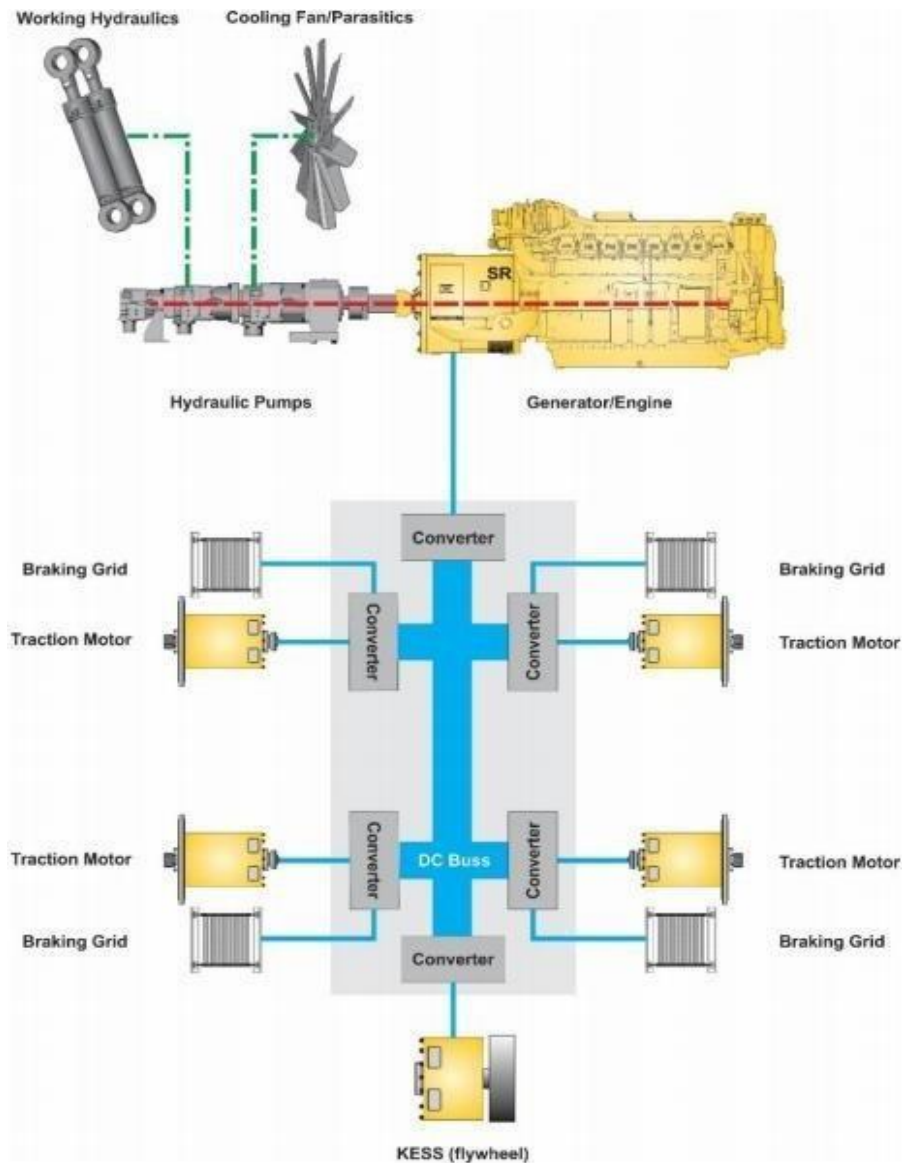


Ilustración 4: Diagrama de proceso del funcionamiento del equipo y tipos de energías involucradas (Rojas, 2017).

### 3.8.3. Aceleración

El motor diésel de este equipo es el encargado de suministrar el movimiento al generador de corriente SR, este funciona como transmisión eléctrica y convierte la energía mecánica proveniente del motor en energía eléctrica para ser proporcionada a los motores SR. Una vez puesto en movimiento el equipo, el motor diésel se encarga de generar energía extra para ser almacenada en la unidad KESS y completada su capacidad el equipo comienza a funcionar con normalidad.

Al desplazarse el equipo, los motores SR son alimentados con la energía almacenada en la unidad KESS y una pequeña parte del motor diésel, siendo la parte restante utilizada en el sistema hidráulica para acciones como el levantamiento del balde.

#### 3.8.3.1. Frenado

El equipo cuenta con diferentes mecanismos de frenado los cuales son: freno ligero o freno eléctrico, freno de servicio, freno mecánico y freno de emergencia. Principalmente este sistema funciona con el freno ligero el cual se activa automáticamente al retirar el pedal de acelerador. La energía generada por la acción de frenado es transferida desde los motores de las ruedas hacia el generador el cual pasa a funcionar como motor, aliviando así el consumo energético al motor diésel.

Según sea la intensidad en la frenada la energía fluye a distintos destinos, al ser un frenado suave, esta se dirige en su totalidad al generador; en un frenado más intenso, la energía es más que suficiente para el funcionamiento del generador, por lo que el exceso se dirige a la unidad KESS.

En caso de un frenado de emergencia, para no provocar un corto circuito en el sistema debido a que la unidad KESS no es capaz de almacenar toda la

energía, esta es enviada a la parrilla de frenado, las cuales son impedancias con resistencia infinita haciendo que la energía sea disipada en forma de calor.

### 3.8.4. Principales sistemas equipo hibrido

#### 3.8.4.1. Motor Switched Reluctance

Este motor es reluctancia conmutada la cual es una solución a la necesidad de creación de voltaje variable para sistemas de corriente alterna y la mayor tasa de mantenimiento para los sistemas de corriente continua. Los motores SR son de alta eficiencia, muy simples, casi nula mantención y funcionan como motor de tracción y generador, dentro de sus principales características tenemos:

- No tiene conmutador ni carbones que reemplazar
- El rotor es una pila de láminas de acero
- Diseño de bobinas simple
- El desgaste es solo en rodamientos
- Diferentes números de polos en rotor y estator

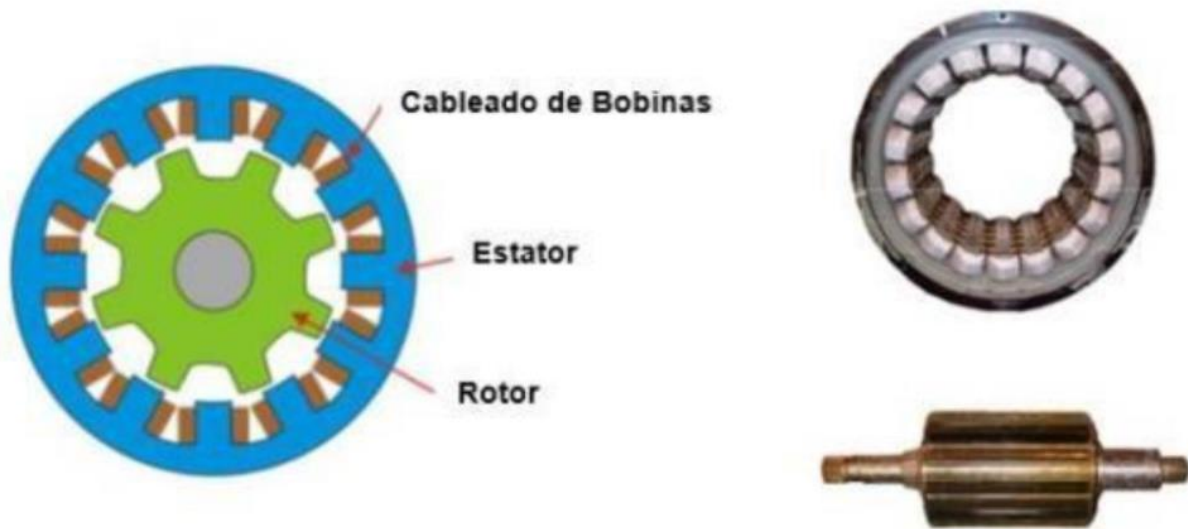


Ilustración 5: Motor SR Rotor y Estator (Rojas, 2017).

#### 3.8.4.2. Sistema almacenamiento de Energía (KESS)

Este sistema consta de un volante de inercia con un motor SR que almacena energía cinética y entrega energía eléctrica a muy alta velocidad. El control del LHD determina cuando el motor del sistema sea energizado mediante la energía de frenado, posteriormente de que el volante alcance las 6500 RPM, el sistema lo utiliza como generador actuando en el movimiento de las ruedas y todos los requerimientos de energía del equipo.



Ilustración 6: Unidad KESS (Rojas, 2017).

### 3.9. Descripción equipo Tradicional

Históricamente se puede describir el equipo de Load, Haul and Dump (LHD) que utiliza únicamente un motor diésel para generar el movimiento directo del equipo a través de transmisión del movimiento del eje del motor hasta el eje que conectaba a las ruedas, como un LHD “tradicional”.

Como lo menciona Baez (2016), el LHD nace de la adaptación de cargadores utilizados en operaciones superficiales. Esto, por las necesidades que presenta el realizar eficientemente las operaciones que componen el nombre/acrónimo LHD (por sus siglas en inglés) como se menciona en el párrafo anterior; la cual presentaba la posibilidad de mejorar los sistemas empleados hasta el momento como es el scraper.

A continuación, se muestra una ilustración de un LHD diésel, el cual de forma externa no aparenta gran diferencia con el híbrido expuesto anteriormente.



Ilustración 7: Imagen LHD Komatsu – JoyGlobal LT- 1050 (Komatsu - JoyGlobal, 2021)

#### 3.9.1. Funcionamiento

Dado que los LHD tradicionales, poseen en general una estructura base similar entre categorías de carga, el chasis o carcasa no es un factor destacable del funcionamiento, esto puede inferirse al observar los catálogos expuestos; por otro lado, se consideran relevantes los siguientes factores:

- Motor
- Tren de impulsión
- Sistema Hidráulico

- Sistema dirección
- Sistema Frenos
- Sistema de control remoto

A continuación, se puede observar el motor del LHD R1600G, el cual es un motor para un equipo de 10,2 Tons de carga (nominal); que presenta los componentes clásicos de un motor a combustión:

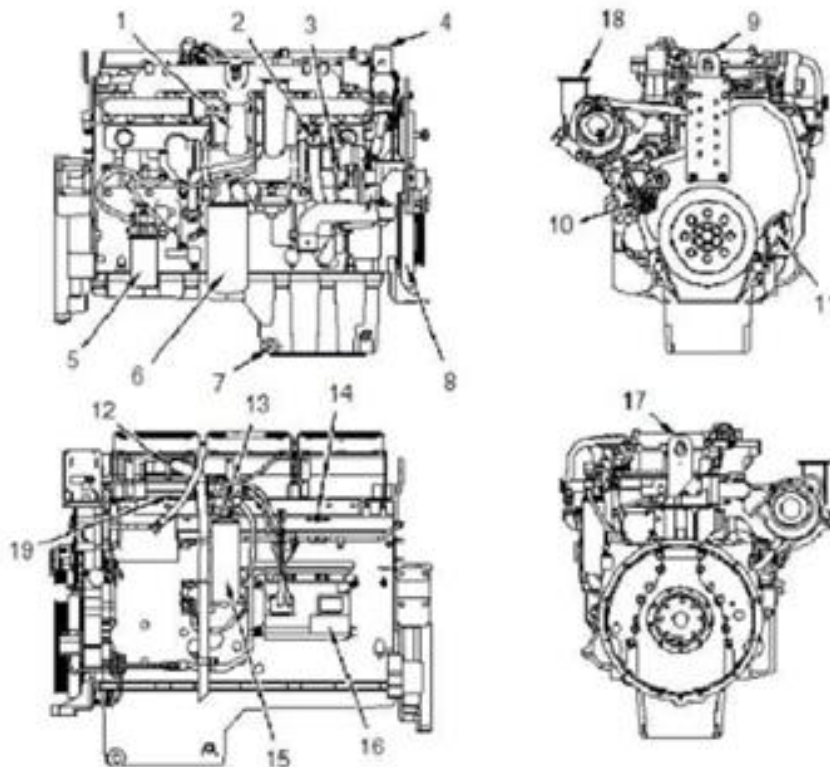


Ilustración 8: Esquema de motor diésel  
C11 ATAAC Cat LHD R1600G (Ferreyros S.A.A., 2011)

Este motor, va conectado a una transmisión que utiliza el movimiento directo generado por el eje del motor, pasando por los componentes y finalizando en las ruedas del LHD; a este sistema se le denomina *tren de impulsión*. Esto se puede ver en el esquema expuesto en la siguiente Ilustración:

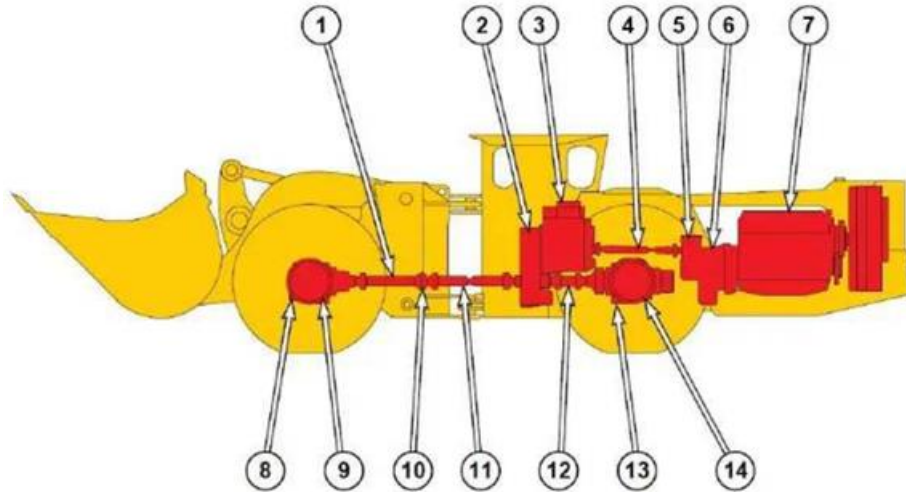


Ilustración 9: Esquema de Tren de Impulsión LHD (Ferreyros S.A.A., 2011) |

### 3.9.2. Puesta en marcha

La puesta en marcha de los motores a combustión diésel, como lo son los utilizados por los LHD tradicionales; son puestos en marcha a partir con un sistema de arranque y de una ignición inicial que comienza un proceso de combustión en presencia de aire - diésel y que despiden inmediatamente un caudal de gases. Como esto lo menciona y es de conocimiento general, posee un consumo de aire, el cual es de 25,8 m<sup>3</sup>/min y de generación de CO entre 1,4 y 3 mg/Nm<sup>3</sup> en el caso del motor C11 CAT (Barloworld Finanzauto CAT, 2021a).

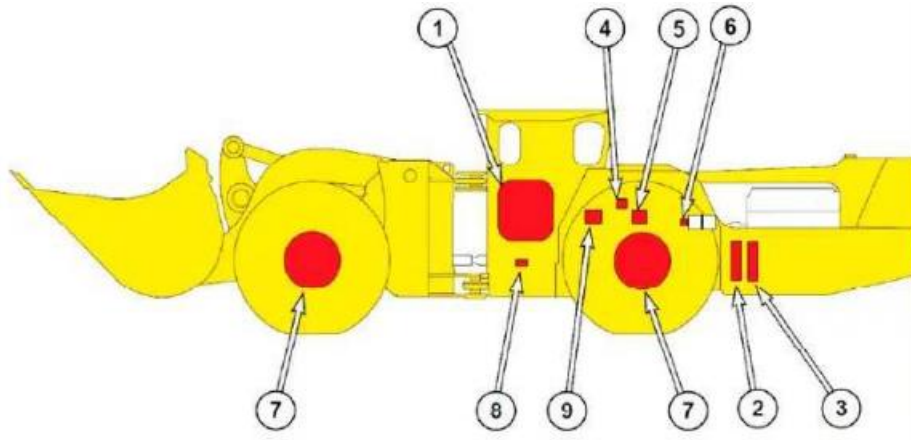
### 3.9.3. Aceleración

La aceleración del motor diésel que potencia el tren de impulsión aumentando las revoluciones a las que funciona el motor, esto a control del operador por medio de la presión del pedal acelerador (Atlas Copco, 2006; Ferreyros S.A.A., 2011). Esta aceleración es dependiente directamente del tamaño de motor, su buen mantenimiento, correcta oxigenación y eje de transmisión; lo que podría reducirse a torque de tren de impulso y correcto estado atmosférico.



### 3.9.4. Frenado

El sistema de frenado este compuesto por diversas partes que no solo llevan a un frenado del movimiento del equipo; sino también el bloqueo del equipo.



*Ilustración 10: Esquema del sistema de frenado LHD R1600G (Ferreyros S.A.A., 2011)*

### 3.10. Descripción equipo eléctrico

Dado que, al inicio de la innovación de equipos mineros, no existían en el mercado baterías de un carácter tal, que pudiese generar los potenciales requeridos para un equipo de minería; al inicio se veían únicamente modelos que necesitaban estar enlazados a una fuente de corriente eléctrica de grado industria, y estos LHD solo podían moverse lógicamente en los intervalos, que dichas conexiones permitían.

Estos modelos han sido re evaluado y acondicionados tecnológicamente, para tener un tiempo de funcionamiento a pesar de estar desconectados de la fuente energética de alimentación, algunos ejemplos de esto son los modelos LH514E y LH625IE de SANDVIK (*Cargadores Eléctricos SANDVIK*, 2021) o los modelos EST2D, EST3.5 Y EST1030 de Epiroc (Epiroc, 2021a).



*Ilustración 11: Imagen LHD modelo EST1030 de Epiroc (Epiroc, 2021b)*



*Ilustración 12: Imagen de LHD modelo LH625IE de SANDVIK (SANDVIK, 2021f)*

En la actualidad, con la nueva tecnología en almacenamiento y eficiencia energética, se han presentado nuevos modelos, los cuales poseen la capacidad de operar con batería, en los lapsos que las jornadas laborales requieren; esto implicando que no deben hacerse tiempos de detención o estados de “recarga de equipo” innecesarias; apuntando a tiempos de tiempo efectivo de sus pares tradicionales o híbridos.



*Ilustración 13: Imagen LHD modelo LH518B de SANDVIK (SANDVIK, 2021d)*



*Ilustración 14: Imagen LHD modelo Scrooptram ST7 de Epiroc (Epiroc, 2018)*

### 3.10.1. Funcionamiento

Dado que los LHD Eléctrico, posee en esencia un sistema de dirección similar al de su par tradicional; por ende, se consideran los siguientes elementos como los relevantes:

- Chasis
- Motor
- Tren de impulsión

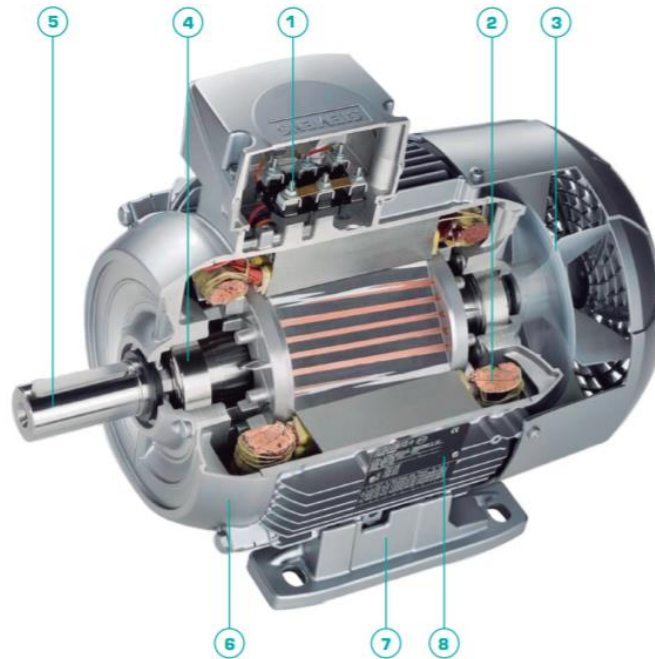
- Sistema Hidráulico
- Sistema de Freno
- Sistema Eléctrico

Como se observa en las cuatro ilustraciones anteriores (11 a 14) en caso de los LHD el chasis o estructura, llega a cambiar; esto es dependiendo si se deben hacer adaptaciones para agregar un *carrete* de cable o una conexión a una batería que puede ser removible para su carga o reemplazo.



*Ilustración 15: Imagen LHD modelo LH518B de SANDVIK, con batería desmontada y en estación de recarga (SANDVIK, 2021d)*

En cuanto al motor, como se entiende en su nombre, el LHD eléctrico utiliza un motor eléctrico, de baja intensidad en la mayoría de los casos, siendo VEM o SIEMENS para los SANDVIK o ABB para el caso de los Epiroc.



- |                                         |                              |
|-----------------------------------------|------------------------------|
| 1. Conexión del motor y caja de bornes. | 5. Eje y rotor.              |
| 2. Bobinas y aislamientos.              | 6. Tapa.                     |
| 3. Ventilador.                          | 7. Patas de fijación.        |
| 4. Rodamientos.                         | 8. Placa de características. |

*Ilustración 16: Esquema componentes y estructura general de motor eléctrico (Dartel - SIEMENS, S.F.)*

En cuanto a cómo el motor genera el movimiento del LHD. Para generar el movimiento del eje, el motor eléctrico activa una bomba hidrostática y siguiente a esto otro motor de tipo hidrostático, el cual genera energía mecánica – cinética aprovechada por el sistema de transmisión (Sánchez, 2006). Siendo estas tres piezas el sustituyente de un motor diésel en el esquema generalizado del *tren de movimiento*; esto puede verse más claramente a continuación:

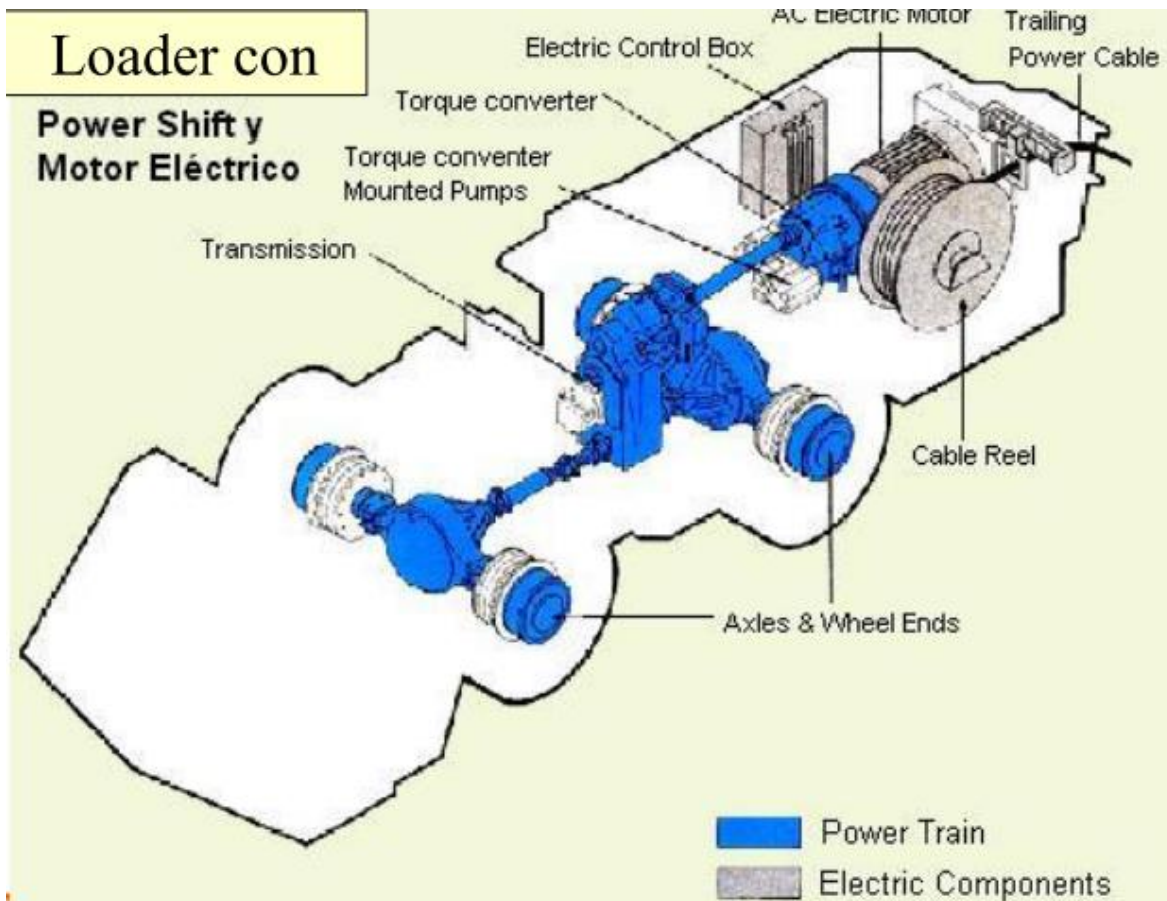


Ilustración 17: Esquema de tren de movimiento para LHD eléctrico SANDVIK (Sánchez, 2006)

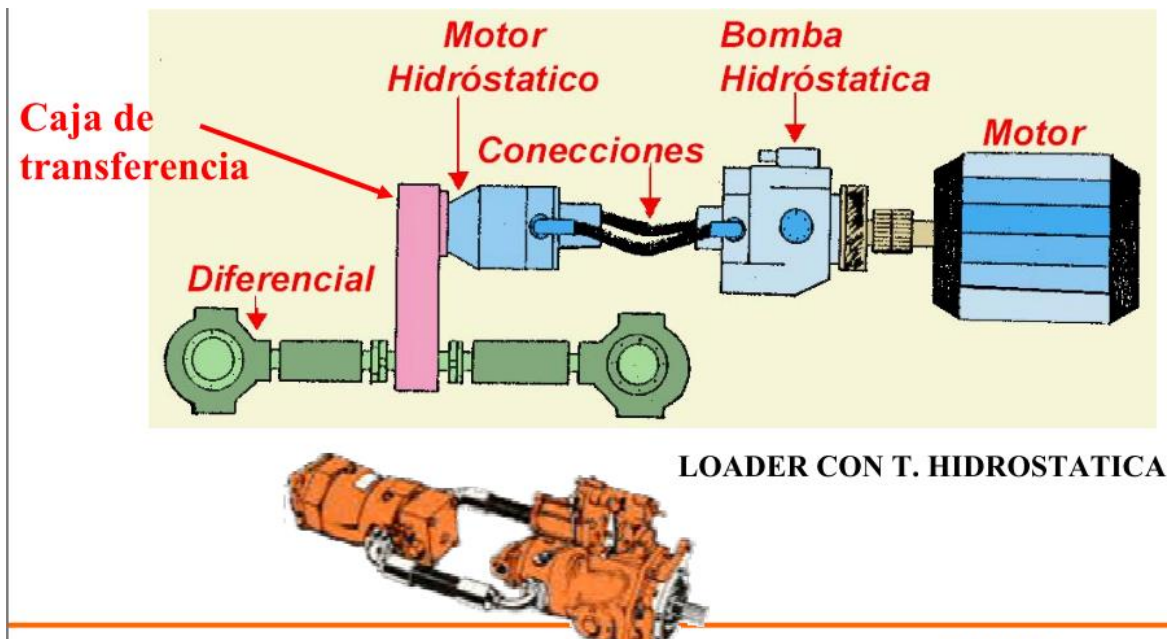


Ilustración 18: Esquema Sistema de propulsión para tren de movimiento LHD eléctrico SANDVIK (Sánchez, 2006)

### 3.10.2. Puesta en marcha

Dado que se trata de un motor eléctrico, para el arranque del equipo no es necesario un sistema de arranque o partida que inicie la función del motor; así mismo no es necesario un volumen de alimentación de aire inicial. El inicio del tren de movimiento comienza con el simple pulsar de un botón y estando conectado a su fuente de alimentación (red eléctrica por su cable o batería cargada).

### 3.10.3. Aceleración

La aceleración del equipo se da en base a las RPM que se van produciendo en el motor eléctrico, dado que este aumentara la velocidad de bombeo hidrostático. Los motores eléctricos trifásicos se aceleran aumentando su frecuencia de línea, en base a como lo expone la siguiente formula:

$$RPM = \frac{120 * f}{2 * P}$$

*Ecuación 1: Calculo de revoluciones por minuto (RPM) para motores eléctricos trifásicos (Dartel - SIEMENS, n.d.)*

Donde f = Frecuencia lineal (Hz)

P = N° de polos del motor

Esto se va logrando al apretar el pedal de aceleración, se va aumentando la frecuencia de ingreso al motor eléctrico, lo que lo acelera, a su vez aumentando la velocidad de la bomba hidrostática y en consiguiente del motor hidrostático (ver ilustración 18).

### 3.10.4. Frenado

Tal como se ha expuesto anteriormente, el sistema de movimiento del LHD eléctrico tiene una gran dependencia de un comportamiento hidrostático e hidráulico; de esta misma forma, es observable en el sistema de frenado del equipo, dado que al iniciar el frenado no solo se genera una reducción en la frecuencia del motor eléctrico; sino que genera una pérdida en la potencia del motor hidrostático por un desvío de presión de fluido (Sánchez, 2006).

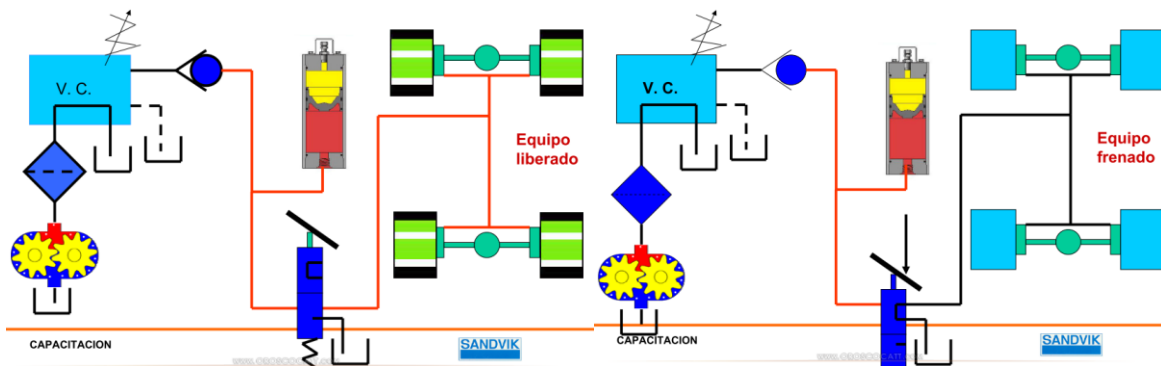


Ilustración 19: Esquema de frenado de LHD eléctrico SANDVIK (Sánchez, 2006)

### 3.11. Ventilación en minería subterránea

Para la extracción de muchos minerales de índole metálico o no metálico, la ventilación no es un tema a tratar, pues su método de obtención no genera dicha necesidad de aire fresco. Para el caso de la minería subterránea en cambio es literalmente una variable de vida o muerte, donde no solo se deben considerar cosas como el número de personas que deben ser abastecidas de aire fresco, sino que también se debe considerar:

- Ubicación de la ventilación (altura referente a orilla del mar y posición en la mina)
- Sistema de extracción de gases nocivos resultantes de tronadura
- Número y tipo de equipos que se encuentran en la mina
- Forma de los túneles y calles



- Extracción de material en suspensión resultante de tronadura, perforación y desplazamiento de equipos o vehículos
- Temperatura de la mina

### 3.11.1. Cálculo de ventilación requerida por equipos de minería subterránea

El art. N° 132 del “R.S.M.” (D.S. N° 72) recomienda un mínimo de 2.83 (m<sup>3</sup>/min) por HP del equipo para máquinas en buenas condiciones (Gallardo, 2008). Pero se sabe que este es un mínimo por equipo en estado de detención; en tanto las emisiones y consumo de un motor a combustión, se van incrementando en relación a la aceleración de este; por ende, se ha llegado a la siguiente fórmula para calcular el caudal de abastecimiento de aire por equipo:

$$Q = \frac{V * c}{y} \quad (m^3/min)$$

*Ecuación 2: Calculo de caudal de aire fresco por equipo con motor diésel (Gallardo, 2008)*

Donde Q = Caudal de aire fresco que debe inyectarse por equipo

V = Volumen de gas de escape producido por el equipo (m<sup>3</sup>/min)

c = Concentración del componente tóxico, del gas de escape, que se considera en particular (% en volumen).

y = concentración máxima, higiénicamente segura, para el componente tóxico que se está considerando (% en volumen).

Este método necesita de un estudio previo para determinar el volumen de gases y la concentración del toxico; el máximo volumen determinado se multiplica por 2 para establecer una ventilación segura (Gallardo, 2008).

### 3.11.2. Tecnología e innovación

Las tecnologías e innovaciones en el área minera, tiende más a la mejora productivas y adhesión de funciones complementarias para suplir usos de otros equipos, por lo que se puede decir que tienden a responder netamente la problemática de los costos productivos; en tanto, otras problemáticas como las observables en la minería subterránea, tales como el consumo de aire o emisiones son minimizadas o poco relevante.

En la instancia de tener que comparar los tipos de LHD de forma tecnológica e innovativa tomando en cuenta, netamente su fuente de alimentación para la impulsión o el motor que posee, descarta la consideración de casos con los mayores índices de tecnología e innovación que son los LHD de control remoto o los automatizados (que no necesitan ningún tipo de control directo, solo vigilancia).

### 3.11.3. Medio ambiente

Como se mencionó anteriormente el medio ambiente es en la actualidad y para generaciones futuras, un factor de alta relevancia; sobre todo al mirar los impactos de las industrias como lo es la minería.

Dada esta nueva conciencia que se ha generado, es que se está haciendo un mayor seguimiento y análisis a cosas tales como las emisiones de gases; esto puede verse en los estudios de la Comisión Chilena del Cobre (Cochilco), las emisiones de gases de efecto invernadero alcanzaron más 5 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> eq en el sector de la minería del cobre en 2013, desde la Región de Tarapacá hasta la Región de O'Higgins; esto representa un aumento de 0,33 millones de ton CO<sub>2</sub> eq respecto del año anterior (Minería Chilena, 2015).

Es por esto que se plantea que en el futuro irán surgiendo cada vez más agrupaciones o colectivos como lo es "Compromiso Minero". Agrupación de al menos 52 grandes empresas dedicadas al rubro de la minería, construcción y

servicios por mencionar algunos; en donde frente al medio ambiente se han propuesto reducir el consumo de agua, utilizar el mar como su fuente de abastecimiento y compartir la que se desalinice, potenciar la generación de energías verdes, generar el cambio de equipos diésel a eléctricos o que utilicen hidrogeno verde, entre otras (Compromiso minero, 2021).

Así mismo, se han comenzado con iniciativas tales como el reducir la huella de carbono restringiéndola con los protocolos de mitigación y la norma ISO14064:2012 (Minería Chilena, 2015).

Además de la utilización de nuevas fuentes de agua como el mar para su uso directo en las operaciones industriales o procesadas para desalinizarlas y posteriormente utilizarlas en los procesos o capital humano o compartir dicha agua con la población circundante (ReporteMinero, 2021). Este proceso de desalinización no solo promueve la obtención de aguas para consumo y uso humano de las que antes no se disponía; sino que también abre la puerta a la obtención de elementos raros y de alto valor que se encuentran en pequeñas concentraciones en el mar, pero que actualmente se han logrado obtener o concentrar a costos rentables como es el caso del litio (Guía Minera de Chile, 2015).

Esto no solo da la oportunidad de incentivar el proceso dado que existe una recuperación económica, sino que da la oportunidad de aprovechar un recurso que está directamente relacionado con la transformación electrónica de equipos dado su alto rendimiento en baterías.

# Capítulo 4

## metodología

## 4. Metodología

Dentro del análisis de estudio la metodología utilizada juega un rol importante, debido a que permite describir una secuencia lógica de los pasos a seguir sujeto a conocimientos previos, para dar respuesta a los objetivos propuestos. Esta secuencia debe ser realizada de manera ordenada y sistemática, considerando la mejor fuente de información para el desarrollo del análisis (Guerrero, 2017)

### 4.1. Recopilación de información complementaria

En esta etapa se recolecta información mediante tesis de memoria, revistas de investigación u otra fuente para complementar la información ya obtenida y abarca un mayor conocimiento previo a las siguientes etapas.

Para esto se utilizan las páginas, catálogos y manuales de las empresas más conocidas en Chile, las cuales son *Komatsu*, *Caterpillar* y *Epiroc*; junto a una menos conocida, *SANDVIK* es innovadora y reconocida en LHD eléctricos.

### 4.2. Análisis de contextos

En sección se contempla los tipos de yacimientos, minas y país en el que se encuentran, junto con los tipos de método de explotación de los cuales se pudo recopilar información para cada LHD. Además de esto, se plantean y contrastan los beneficios u incentivos presentados por el uso de cada tipo de equipo, ya sea a nivel país u sectorial donde se encuentre funcionando el LHD.

Contrastar incentivos de índole ecológico (electro movilidad o transformación, uso de energías verdes, cambio de flota y similares) de Chile y el mundo; además, en opuesto, la sanción por incumplimiento de ciertos criterios o parámetros en el mundo, pero aceptados en Chile.

### 4.3. Comprensión Técnica

Se comprenden los elementos distintivos de cada LHD en el ámbito productivo, de mantención y característicos de su funcionamiento. Esto generando un cuadro comparativo de términos equivalentes entre las especificaciones y necesidades mecánicas de cada equipo. Así como la caracterización de tiempos de funcionamiento o rendimientos operativos destacando el tipo de fuente de alimentación utilizada.

Tanto de la información que disponen los catálogos de las empresas previamente nombradas, como aquella que pueda encontrarse de otras fuentes fiables, adquiridas en la recopilación de información.

### 4.4. Nivel innovativo y tecnológico

Comparación de tecnologías e inventiva entre los equipos, realizando una contextualización de tiempo y contraste entre los LHD. Usando puntos de referencias generales; tales como, incentivos estatales, momento de implementación nacional respecto al mundo y si es que están asociados a los movimientos innovativos de moda en el ámbito de los equipos LHD o respecto a las necesidades contextuales de cada tecnología.

### 4.5. Análisis económico

Utilizando la información recopilada y procesada por los puntos anteriores, establecer una comprensión económica de las posibilidades de las variables comunes y diferentes en términos económicos. Además, evaluar casos de mantención de una flota fija del LHD tradicional, en contraste con los otros tipos.; junto con la de un posible cambio total de flota de tradicional a eléctrico y tradicional a híbrido, en términos económicos.

# Capítulo 5

## Resultados

## 5. Análisis de resultados

### 5.1. Contextos de comparación

En la proyección de consumo eléctrico realizado por COCHILCO del año 2017 al 2028, contempla una serie de desplazamientos (aumentos y disminución) de consumos energético, donde se menciona que por nuevos proyectos de diversos indoles pero esencialmente innovación o nuevas propuestas, la exigencia de estos, llegaría a ser el 55% de los requerimientos necesarios el 2028 (COCHILCO, 2017). Esto mismo se ve reflejado tanto por la agrupación de **Compromiso Minero** como por **Compromiso público privado por la electromovilidad 2022**, quienes han planteado llegar a un nivel de reducción de emisiones de gases contaminantes en equipos mineros y de transporte de personal, hasta el punto de llegar a la emisión 0, esto a través de fuertes incentivos económicos y compromisos escritos entre privados y con agencias públicas, junto a declaraciones públicas (Compromiso minero, 2021; Gobierno de Chile - Ministerio de Energía, 2017). Esto mismo, ya se comienza a exponer en el 2019, se expone que alrededor del 40% del consumo energético de las minas subterráneas es en sistemas de ventilación y que posterior a hacer un recambio de flota tradicional (diésel) a una eléctrica, pese al consumo de estos nuevos equipos, aun se ahorraría un 50% de los costos en ventilación, significando un requerimiento de 33.000 MWh menos (ElectroMov, 2019).

En cuanto al proceso que está llevando a cabo Chile, para la sustentación y abastecimiento de dichos nuevos equipos junto al resto de industrias y las personas, Chile se ha proyectado al suministro y cambio a energías sustentables, el cual en el año 2021 ya era del 20%, pero para mantenerse por el camino correcto para que en el futuro estos cambios ocurran realmente, se deben apresurar en realizar ciertas normativas, incentivos y controles como la aprobación de la ley RPS o las creación por parte de los bancos de bolsas de inversión blanda para innovación eléctrica o de energías renovables (Agostini et al., 2018; Qadir et al., 2021).



Esta oportunidad e incitación a la transformación energética en la minería también se puede ver en noticias internacionales. Noticias que exponen el gran campo de inversión y oportunidad de acceso que se tiene tanto de equipos eléctricos como servicios, junto a los fondos que fomentan esta actividad con el fin de llegar al uso exclusivo de electricidad (El Baz, 2020).

## 5.2. Características técnicas distintivas

En el ámbito técnico de los equipos, se disponen a comparación de características productivas y operativas tales como el llenado de balde estándar, velocidades máximas, tiempos de carga, descarga y similares. Respecto a estas características, se expondrán primero por empresa y posteriormente un contraste capacidad de tonelaje.

### A. Caterpillar

En la siguiente tabla se observa la información disponible según folletos, catálogos e información disponible por la página web de Caterpillar (CAT, 2021c, 2021a, 2021b):

Tabla 1: Modelos de Caterpillar con capacidades cercanas a los tonelajes 10, 18 y 20

Modelo	Capacidad (Ton)	Motor	Combustible Tipo
R1600H	10.2	Cat C11	Diésel
R2900	17.2	Cat C15	Diésel
R3000H	20	Cat ACERT C15	Diésel

Tabla 2: Características general para los modelos seleccionados de Caterpillar

Modelo	Características generales								
	Vel. frontal max km/hr	Vel. retroceso km/hr	levanta (s)	Descarga (s)	Descenso, vacío, libre (s)	Cucharon de descarga estd (m <sup>3</sup> )	Angulo articulación	Tanque combustible (Lts)	Ruido dB(A)
R1600H	27.5	29.5	7.6	1.6	2	4.8	42.5°	400	
R2900	30.4	32.8	9.2	3.4	3.1	7.2	42.5°	630	116,8 +/- 2,5
R3000H	31.6	33.8	8.8	1.85	3.51	8.9	42.5°	1539	

De estas tablas, comprendemos que Caterpillar intenta describir la mayor cantidad de aspectos de sus equipos, incluyendo en algunos de estos, las emisiones de ruido del equipo. Pero no posee equipos de funcionalidad diferente a la combustión de diésel.

En tanto de los mencionados motores C11, C15 y ACERT C15; se da a conocer los caudales de aire y combustible consumidos en la combustión, junto a las emisiones generadas de este proceso, en la tabla 3 (Barloworld Finanzauto CAT, 2021b, 2021a).

Tabla 3: Características de emisiones y consumo de motores diésel CAT

Motor	Volumen de aire de combustión (m <sup>3</sup> /min)	Caudal de gases de escape (m <sup>3</sup> /min)	Consumo de combustible (L/hr)
Cat C11	25.8	68.8	80.1
Cat C15	35.9	98.3	109.4
Cat ACERT C15	35.9	98.3	109.4

De lo anterior se puede interpretar que los equipos tienen un funcionamiento continuo, en base al combustible, esto se visualiza en la siguiente tabla:

Tabla 4: Horas de funcionamiento continuo por combustible LHD CAT

Modelo	Motor	Horas de funcionamiento
R1600H	Cat C11	5.0
R2900	Cat C15	5.8
R3000H	Cat ACERT C15	14.1

Junto a los resultados anteriormente expuestos en la tabla 3 y 4, es posible establecer la ventilación de abastecimiento y extracción mínima de aire requerida solo para un LHD de los seleccionados en el periodo que dura un estanque de combustible.

Tabla 5: Inyección de aire y extracción de gases necesario por LHD CAT seleccionado

Modelo	Horas de funcionamiento	Volumen de aire de combustión (m <sup>3</sup> )	Caudal de gases de escape (m <sup>3</sup> )
R1600H	5.0	7730.3	20614.2
R2900	5.8	12404.2	33964.7
R3000H	14.1	30301.7	82971.0

Referente a las emisiones, generadas por el motor CAT C11, C15 y ACERT C15 se entrega la información por parte de Caterpillar las siguientes emisiones:

EMISIONES (VALORES GARANTIZADOS)

rpm	2100	2100	2100	2100	2100
% carga	100	75	50	25	10
Potencia motor kWm	313,0	234,8	156,5	78,3	31,3
NOx (mg/Nm <sup>3</sup> )	1.626,5	918,7	716,6	1.000,6	748,9
CO (mg/Nm <sup>3</sup> )	1.421,3	1.090,6	565,5	2.512,8	3.013,7
HC (mg/Nm <sup>3</sup> )	47,0	69,8	198,1	955,6	849,8
Partículas(mg/Nm <sup>3</sup> )	116,9	63,6	70,3	225,0	442,8
% O <sub>2</sub> en escape	9,60	11,40	13,30	14,70	16,50

Los valores de emisiones dados en mg/Nm<sup>3</sup> están referidos al 5% de O<sub>2</sub>.

Ilustración 20: Emisiones garantizados de gases para el motor CAT C11(Barloworld Finanzauto CAT, 2021a)

### EMISIONES (VALORES GARANTIZADOS)

Rpm	2100	2100	2100	2100	2100
% carga	100	75	50	25	10
Potencia motor kWm	403,0	302,3	201,5	100,8	40,3
NOx (mg/Nm <sup>3</sup> )	1.516,7	966,6	708,9	1.700,3	2.028,4
CO (mg/Nm <sup>3</sup> )	1.504,3	642,6	445,2	1.631,3	2.001,7
HC (mg/Nm <sup>3</sup> )	35,9	74,5	134,5	175,9	315,8
Partículas(mg/Nm <sup>3</sup> )	128,8	57,0	68,7	453,3	368,8
% O <sub>2</sub> en escape	3,10	11,90	13,60	14,90	16,70

Los valores de emisiones dados en mg/Nm<sup>3</sup> están referidos al 5% de O<sub>2</sub>.

*Ilustración 21: Emisiones garantizados de gases para el motor CAT C15 y ACERT C15 (Barloworld Finanzauto CAT, 2021b)*

### B. Komatsu

Así como el caso de los LHD Caterpillar, para Komatsu se seleccionaron modelos de LHD de capacidades cercanas a las 10, 18 y 20 toneladas, basado en las fichas técnicas y catálogos de los equipos (Joy Global, 2017; Komatsu - JoyGlobal, 2021).

*Tabla 6: Modelos de Komatsu con capacidades cercanas a los tonelajes 10, 18 y 20*

Modelo	Capacidad Ton	Motor	Tipo de Combustible	Motor eléctrico
Joy LT-1051	9.979	Cummins QSL 9	Diésel	-
Joy 18HD	18	US tier IV final/EU stage IV Series 1100, 10.6 litros	Hibrido	SR
Joy 22HD	22	US tier IV final/EU stage IV Series 1300, 12.8 litros	Hibrido	SR

Tabla 7: Características general para los modelos seleccionados de Komatsu

Modelo	Características generales							
	Vel. Frontal. max km/hr	Vel. Retroceso. km/hr	Levanta (s)	Descarga (s)	Descenso, vacío, libre (s)	Cucharón de descarga estd. (m <sup>3</sup> )	Angulo articulación	tanque combustible (Lts)
Joy LT-1051	14.6	-	5	4	4	4.6	42.5°	481
Joy 18HD	27	27	8.2	2.2	3.4	7.2	46°	757
Joy 22HD	27	27	8.4	2	4	9	46°	757

Observando las tablas 6, 7 y la información expuesta en las fichas técnicas, se podría inferir que Komatsu tiene mayor interés con que se conozcan los modelos híbridos que el modelo tradicional. En tanto, a las cifras de la tabla 7, se observa que los parámetros operacionales muestran una similitud entre los 2 modelos híbridos.

Siguiendo con lo anterior, los motores utilizados por estos equipos corresponden a líneas distintas, además de la existencia de 2 clases de motores en los modelos híbridos, los cuales presentan las siguientes características (Cummins Inc., 2015; Cummins MerCruiser Diesel, 2007; *Emission Standards EU: Nonroad Engines*, 2016; Mercedes-Benz, n.d.; Perkins, 2015) :

Tabla 8: Características de emisiones y consumo de motores diésel Komatsu

Motor	Volumen de aire de combustión (m <sup>3</sup> /min)	Caudal de gases de escape (m <sup>3</sup> /min)	Consumo de combustible (L/hr)
Cummins QSL 9	8.52	24.48	80.2
US tier IV final/EU stage IV Series 1100, 10.6 litre	12.1	30.53	87
US tier IV final/EU stage IV Series 1300, 12.8 litre	15.22	34.48	95.6

De la tabla 7 y 8 se puede extrapolar un el tiempo de funcionamiento aproximado del equipo en base a combustible, como puede verse a en la siguiente tabla:

*Tabla 9: Horas de funcionamiento continuo por combustible LHD Komatsu*

Modelo	Motor	Horas de funcionamiento
Joy LT-1051	Cummins QSL 9	6.0
Joy 18HD	US tier IV final/EU stage IV Series 1100, 10.6 litre	8.7
Joy 22HD	US tier IV final/EU stage IV Series 1300, 12.8 litre	7.9

Dada la información entregada por las tablas 8 y 9, es posible estimar los volúmenes de aire a inyectar y de gases a extraer por llenado de cada LHD; esto se expone en la siguiente tabla:

*Tabla 10: Inyección de aire y extracción de gases necesario por LHD Komatsu seleccionado*

Modelo	Motor	Horas de funcionamiento	Volumen de aire de combustión (m <sup>3</sup> /carga combustible full)	Volumen de gases de escape (m <sup>3</sup> /carga combustible full)
Joy LT-1051	Cummins QSL 9	6.0	3065.93	8809.13716
Joy 18HD	US tier IV final/EU stage IV Series 1100, 10.6 litre	8.7	6317.03	15938.7655
Joy 22HD	US tier IV final/EU stage IV Series 1300, 12.8 litre	7.9	7231.09	16381.6067

Siguiendo con lo anterior, los volúmenes de gases de escape tienen un contenido aproximado de gases de escape, esto es visible en la siguiente tabla:

## Emissions Data – Catalyst Out Emissions (Catalyst Dependent)

NOx	g/hp-hr	0.5
CO	g/hp-hr	2.0
VOC	g/hp-hr	0.7

Ilustración 22: Ilustración emisiones QSL9G (Cummins Inc., 2015)

Cat.	Net Power	Date	CO	HC	NOx	PM
	<i>kW</i>					
Q	130 ≤ P ≤ 560	2014.01	3.5	0.19	0.4	0.025
R	56 ≤ P < 130	2014.10	5.0	0.19	0.4	0.025

Ilustración 23: Ilustración de emisiones motores US tier IV final/EU stage IV (Emission Standards EU: Nonroad Engines, 2016)

### C. Epiroc

Epiroc tiene una gran variedad de equipos eléctricos y diésel con diferentes capacidades de carga, pero dada la determinar de centrarse en los LHD de capacidades entre los 10, 18 y de 20 o más toneladas, se tomarán en cuenta solo los scooptram ST1030, ST18, EST1030 y ST14 Battery.

Parte de las características técnicas descriptivas se encuentran en la siguiente tabla (Atlas Copco, 2006; Epiroc, 2017b, 2017a, 2021c, 2021b):

Esos videos servirían de apoyo previo a comenzar con la tarea

Tabla 11: Modelos de Epiroc con capacidades cercanas a los tonelajes 10, 18 y 20

Modelo	Capacidad Ton	Motor	Tipo de combustible
ST1030	10	Cummins QSL9	Diésel
ST18	17.5	Cummins QSX15	Diésel
EST1030	10	3 phase, 50 Hz	Eléctrico
ST14 Battery	12	ABB	Eléctrico

Se observa de la tabla anterior que Epiroc, no posee un modelo de LHD que se iguale o supere una capacidad de 20 toneladas; además de esto, se contempla la aparición de 2 tipos de LHD eléctrico, uno con cable (EST1030) y otro con batería (ST14 Battery), aunque ha de ser destacado que son equipos una capacidad mido – baja.

Referente a algunos de los datos técnicos, se pueden observar algunos en la siguiente tabla (Atlas Copco, 2006; Epiroc, 2017b, 2017a, 2021c, 2021b):

Tabla 12: Características general para los modelos seleccionados de Epiroc

Modelo	Capacidad Ton	Características generales					
		vel frontal max km/hr	levanta (s)	Descarga (s)	Descenso, vacío, libre (s)	Cucharon de descarga estd (m <sup>3</sup> )	tanque combustible
ST1030	9	24.9	8	2.1	6	4.5	284 Lts
ST18	18	27	7.2	2.8	4	7.9	626 LTS
EST1030	10	15.1	8	2.1	6	4.5	-
ST14 Battery	12	35	7.6	2	4	6.4	-

En tanto, a las características de emisiones, aire fresco y consumo de combustible por parte de los motores se refiere, pueden verse en la siguiente tabla (ABB, 2003, 2018, 2022; Cummins Engine Company, 2000; Cummins Inc., 2010, 2011, 2015, 2022a, 2022b; Cummins MerCruiser Diesel, 2007; *United States : Cars and Light-Duty Trucks : Tier 2*, 2022) :

Tabla 13: Características de emisiones y consumo de motores diésel Epiroc

Motor	Volumen de aire de combustión (m <sup>3</sup> /min)	Caudal de gases de escape (m <sup>3</sup> /min)	Consumo de combustible (L/hr)
Cummins QSL9	8.52	24.48	80.20
Cummins QSX15	43.92	108.90	114.00
3 phase, 50 Hz	-	-	-
ABB	-	-	-



En la tabla 13, aparecen netamente los modelos Diésel, dado que motores eléctricos trifásicos son múltiples, al igual que los existentes por ABB; además de no presentar un consumo de combustible como tal o necesitar directamente de aire para generar la energía de desplazamiento del tren impulsor. El modelo EST1030 es cableado, por ende, está en constante suministro y consumo de energía eléctrica; en tanto, el modelo ST14 Battery, posee un consumo variable de su batería.

En tanto a los tiempos de uso que poseen dichos equipos, se expone lo siguiente:

*Tabla 14: Horas de funcionamiento según combustible de equipos Epiroc seleccionados*

Modelo	Motor	Horas de funcionamiento
ST1030	Cummins QSL9	3.5
ST18	Cummins QSX15	5.5
EST1030	3 phase, 50 Hz	Ilimitado
ST14 Battery	ABB	Variable

Respecto a las emisiones generadas por los motores expuestos en la tabla 13 y las horas de funcionamiento de la tabla 14, se entiende que los motores eléctricos no generan emisiones de gases de forma directa, por lo que se limita a los motores a combustión. Esto se refleja en los caudales de alimentación y extracción que se necesitan, los cuales se exponen a continuación:

*Tabla 15: Inyección de aire y extracción de gases necesario por LHD Epiroc seleccionado*

Modelo	Motor	Horas de funcionamiento	Volumen de aire de combustión (m3/carga combustible full)	Caudal de gases de escape (m3/carga combustible full)
ST1030	Cummins QSL9	3.5	1810.23	5201.24
ST18	Cummins QSX15	5.5	14470.48	35879.68
EST1030	3 phase, 50 Hz	Ilimitado	-	-
ST14 Battery	ABB	Variable	-	-

Estas emisiones pueden observarse en la ilustración 22 para el motor Cummins QSL9, mientras que las emisiones del motor Cummins QSX15 en la siguiente ilustración:

Tier 2 Emission standards, FTP 75, g/mi

Bin#	Intermediate life (5 years / 50,000 mi)					Full useful life				
	NMOG*	CO	NOx	PM	HCHO	NMOG*	CO	NOx†	PM	HCHO
Temporary Bins										
11 MDPV <sup>c</sup>						0.280	7.3	0.9	0.12	0.032
10 <sup>a,b,d,f</sup>	0.125 (0.160)	3.4 (4.4)	0.4	-	0.015 (0.018)	0.156 (0.230)	4.2 (6.4)	0.6	0.08	0.018 (0.027)
9 <sup>a,b,e,f</sup>	0.075 (0.140)	3.4	0.2	-	0.015	0.090 (0.180)	4.2	0.3	0.06	0.018
Permanent Bins										
8 <sup>b</sup>	0.100 (0.125)	3.4	0.14	-	0.015	0.125 (0.156)	4.2	0.20	0.02	0.018
7	0.075	3.4	0.11	-	0.015	0.090	4.2	0.15	0.02	0.018
6	0.075	3.4	0.08	-	0.015	0.090	4.2	0.10	0.01	0.018
5	0.075	3.4	0.05	-	0.015	0.090	4.2	0.07	0.01	0.018
4	-	-	-	-	-	0.070	2.1	0.04	0.01	0.011
3	-	-	-	-	-	0.055	2.1	0.03	0.01	0.011
2	-	-	-	-	-	0.010	2.1	0.02	0.01	0.004
1	-	-	-	-	-	0.000	0.0	0.00	0.00	0.000
* for diesel fueled vehicle, NMOG (non-methane organic gases) means NMHC (non-methane hydrocarbons)										
† average manufacturer fleet NOx standard is 0.07 g/mi for Tier 2 vehicles										
a - Bin deleted at end of 2006 model year (2008 for HLDTs)										
b - The higher temporary NMOG, CO and HCHO values apply only to HLDTs and MDPVs and expire after 2008										
c - An additional temporary bin restricted to MDPVs, expires after model year 2008										
d - Optional temporary NMOG standard of 0.195 g/mi (50,000) and 0.280 g/mi (full useful life) applies for qualifying LDT4s and MDPVs only										
e - Optional temporary NMOG standard of 0.100 g/mi (50,000) and 0.130 g/mi (full useful life) applies for qualifying LDT2s only										
f - 50,000 mile standard optional for diesels certified to bins 9 or 10										

Ilustración 24: Ilustración de emisiones motores EPA Tier 2 (United States: Cars and Light-Duty Trucks: Tier 2, 2022)

## D. SANDVIK

Sandvik es la más focalizada en modelos eléctricos de entre el grupo selecto de empresas; dado que posee múltiples modelos diésel, eléctrico con cable y eléctrico a batería, pero los más potentes y destacados son sus LHD de 25 toneladas de capacidad. Los modelos seleccionados corresponden a los expuestos en la siguiente tabla (*Cargadores Eléctricos SANDVIK, 2021; Cargadores Subterráneos*

Diésel SANDVIK, 2021; SANDVIK, 2020, 2021, 2021b, 2021c, 2021d, 2021e, 2021f):

Tabla 16: Modelos de SANDVIK con capacidades cercanas a los tonelajes 10, 18 y 20

Modelo	Capacidad Ton	Motor	Tipo de combustible
LH400t	10	Deutz F12L413 FW	Diésel
LH517i	17.2	Volvo TAD1342VE	Diésel
LH621i	21	Volvo TAD1344VE	Diésel
LH409e	9.6	3phase VEM	Eléctrico
LH518b	18	Permanent Magnet, AC 3	Eléctrico
LH625ie	25	3phase Siemens	Eléctrico

Observando la tabla anterior y en base a lo mencionado previamente, se observa que SANDVIK posee un mayor foco en los LHD de índole eléctrico que las otras empresas expuestas, así mismo como se ve el uso de diversos motores diésel y eléctricos.

En tanto, a lo que las características de tiempo y capacidades se refiere, estas se exponen en la siguiente tabla:

Tabla 17: Características general para los modelos seleccionados de SANDVIK

Modelo	Capacidad Ton	Características generales						
		vel frontal max km/hr	Levanta s	Descarga s	Descenso, vacío, libre s	Cucharón de descarga estd m <sup>3</sup>	Ang articulación	tanque combustible Lts
LH400t	10	23.5	7	3	3.5	4	42.5	380
LH517i	17.2	30.4	8.3	2	4.3	7	42.5	580
LH621i	21	31.6	8.4	1.8	3.51	8	42.5	760
LH409e	9.6	11.8	8	3	4.5	3.8	40	-
LH518b	18	28.3	8.3	2	4.3	6.6	42.5	-
LH625ie	25	17.7	9	2.5	6.2	10	42.5	-

A diferencia de los otros casos expuestos, en el caso de los modelos de SANDVIK, se observa una gran variación en las velocidades frontales de los equipos, siendo los modelos eléctricos más lentos a sus homónimos diésel.

Respecto a las características que poseen los equipos en base a los motores que utilizan, los LHD Sandvik seleccionados, se presenta una apariencia similar a la expuesta en el caso de Epiroc, que es el no consumo o necesidades de ventilación directa de parte de los equipos eléctricos (DEUTZ, 2014; PMK, n.d.; Siemens, 2020; VEM - Cosgra S.A., 2008; VEM, 2017; Volvo: *List of Engines*, 2021; Volvo Penta, n.d., 2013a, 2013b), esto puede verse en la siguiente tabla:

*Tabla 18: Características de emisiones y consumo de motores diésel Sandvik*

Motor	Volumen de aire de combustión (m <sup>3</sup> /min)	Caudal de gases de escape (m <sup>3</sup> /min)	Consumo de combustible (L/hr)
Deutz F12L413 FW	8.52	24.48	80.20
Volvo TAD1342VE	770.40	846.60	86.34
Volvo TAD1344VE	812.40	892.20	89.97
3phase VEM	-	-	-
Permanent Magnet, AC 3	-	-	-
3phase Siemens	-	-	-

Respecto a la tabla anterior se puede observar un comportamiento entre motores vistos previamente, la cual es que los modelos basados en propulsión por combustión de diésel poseen rendimientos o consumos de combustible similares pese a cambiar de tamaños y potencias. Siguiendo con esto, al cruzar los datos de la tabla 17 y 18, se puede obtener tanto el tiempo de funcionamiento como los requerimientos de ventilación necesarios para alimentar la combustión de los equipos y extraer los gases nocivos, esto puede ser visibilizado en la siguiente tabla:

Tabla 19: Horas de funcionamiento según combustible y volúmenes de aire necesarios de ingresar o extraer de equipos Sandvik seleccionados

Modelo	Motor	Horas de funcionamiento	Volumen de aire de combustión (m <sup>3</sup> /carga combustible full)	Caudal de gases de escape (m <sup>3</sup> /carga combustible full)
LH400t	Deutz F12L413 FW	4.7	2422.14	6959.40
LH517i	Volvo TAD1342VE	6.7	145097.08	152351.94
LH621i	Volvo TAD1344VE	8.4	206786.84	231114.70
LH409e	3phase VEM	Ilimitado	-	-
LH518b	Permanent Magnet, AC 3	Variable	-	-
LH625ie	3phase Siemens	Ilimitado	-	-

En tanto, a lo que respectan las emisiones de dichos volúmenes refiere, resulta ser que los 3 motores de combustión diésel están regulados a la norma tier 2 o EU stage II y dichas concentraciones de gases en la emisión se encuentran en la siguiente ilustración:

EU Stage I/II emission standards for nonroad diesel engines

Cat.	Net Power	Date*	CO	HC	NOx	PM
	kW					
<b>Stage I</b>						
A	130 ≤ P ≤ 560	1999.01	5.0	1.3	9.2	0.54
B	75 ≤ P < 130	1999.01	5.0	1.3	9.2	0.70
C	37 ≤ P < 75	1999.04	6.5	1.3	9.2	0.85
<b>Stage II</b>						
E	130 ≤ P ≤ 560	2002.01	3.5	1.0	6.0	0.2
F	75 ≤ P < 130	2003.01	5.0	1.0	6.0	0.3
G	37 ≤ P < 75	2004.01	5.0	1.3	7.0	0.4
D	18 ≤ P < 37	2001.01	5.5	1.5	8.0	0.8

\* Stage II also applies to constant speed engines effective 2007.01

Ilustración 25: Tabla de emisiones EU II del motor Deutz F12L413 FW, Volvo TAD1342VE y TAD1344VE (Emission Standards EU: Nonroad Engines, 2016)

### 5.3. Comparación de innovación y tecnología

En cuanto a las primeras pruebas industriales del equipo híbrido no remontamos a 2015 donde es puesto a prueba en Australia específicamente en la mina Ridgeway y posteriormente fue puesto a prueba en la mina Cadia East Underground Cave donde tuvo la primera puesta dentro de una operación minera. En cuanto al desarrollo de su tecnología esta radica en el cargador frontal diseñado por la empresa LeTourneau los cuales diseñaron los motores de tracción y el generador, posteriormente esta empresa es adquirida por Joy Global los cuales a su vez son adquiridos por Komatsu. Esta tecnología Híbrida plantea la idea de reutilizar la energía haciendo más eficiente el sistema reintegrando al sistema la energía desprendida por los frenos en forma de calor, esta tecnología la vemos presenta en otra industrias como lo es la automotriz principalmente en la Formula 1 donde los ingenieros detrás de los vehículos buscan obtener energía que se puede disipar en forma de calor ya sea de los frenos o del mismo turbocargador que alimenta al motor para tenerla a disposición cuando la necesiten como lo es por ejemplo al acelerar después de una curva.

Por parte de los equipos LHD diésel sus primeras apariciones datan de la década del 60 y la tecnología presente en su motor responde a las normativas medioambientales las cuales han ido restringiendo las emisiones admitidas por estos motores la cual se conoce como norma Tier. Actualmente la industria se enfrenta a una posible transición a un nuevo estándar de motores, es decir, Tier 4, lejos del actual estándar de motores Tier 3.

Para el equipo eléctrico, su entrada en el mercado data en la década del 80 y su principal problema en ese entonces radica en el cable que suministra la energía, el cual presenta problemas que son afectados por el diseño de la malla, la cual debería verse cambiada para obtener una extracción provechosa, Además, el LHD pasaría por arriba del cable cada vez que tenga que retroceder, generando un riesgo extra que puede terminar en la rotura de este. No obstante, Laubscher (2003) señala que el diseño de la malla de extracción Henderson permite tanto el uso de equipos eléctricos como diésel. En el caso de la malla de extracción tipo teniente

ocurre el mismo problema señalado anteriormente, por ende, los LHD con cable no son compatibles con el diseño de esta malla. Respecto a su versión con baterías requerían de 1,5 a 2 toneladas de baterías, y esto solo permitía 2 a 2,5 horas de tiempo de trabajo. El tiempo de recarga se estimó entonces en 50 min para un 90% de batería. Actualmente, con los avances en la tecnología de estas baterías el tiempo de recarga se redujo a la mitad, además de un tiempo de reemplazos de estas mejor a 6 min para el equipo SANDVIK LH518B junto con una duración de estas definido por el uso del equipo, donde depende de las tareas que realiza; pero la duración puede llegar a ser de 4 a 12 hrs.

#### 5.4. Contraste de factor económicos

Dada la tendencia de los últimos años en el alza en los precios de los combustibles y a su vez en el aumento de la diferencia entre el costo de la electricidad y del propio diésel es que las tecnologías de equipos híbridos y eléctricos (en especial este último) toman una mayor importancia en la minería.

El consenso entre las fuentes sugiere que el valor de los eLHD en 2014 es entre un 16% y 20% mayor que el de un LHD tradicional, además, el costo estimado de un eLHD a batería (4yd<sup>3</sup>) se encuentra ligeramente por encima de los eLHD con cable. También cabe mencionar que los costos de capital de los eLHD y LHD tradicional están fuertemente correlacionados con el tamaño del depósito y el tamaño del balde a su vez está fuertemente correlacionado con los costos operativos por hora. No obstante, en base a lo último el costo de un eLHD a batería de un tamaño mayor sería eventualmente mayor y por sobre el de un eLHD con cable y del tradicional diésel (Varaschin, 2016).

Por otra parte, al comparar el equipo híbrido contra el tradicional diésel se aprecia que el LHD híbrido cuenta con un Capex mayor en comparación al equipo diésel aproximadamente un 21% y el equipo diésel con un Opex un 50% mayor que el

equipo híbrido. Esta disminución se debe a mejoras en varios indicadores clave de rendimiento, como ahorros en costos operativos, ahorros en costos de mantenimiento y reparación, y mayor disponibilidad física.

Al considerar la implementación de LHD eléctricos en una operación minera subterránea, determinó que habría al menos cinco generadores de costos significativos los cuales son impactados positivamente por la nueva tecnología, los cuales están relacionados con la reducción en el flujo de aire discutido anteriormente (Varaschin, 2016). Esto se podría traducir en reducción en la infraestructura de ventilación y su configuración. No obstante, se desconoce el valor de las emisiones de calor de los equipos híbridos y eléctricos, pero se estima que las tasas de ventilación de los equipos eléctricos podrían reducirse solo entre un 10 y un 40 % (Halim & Kerai, 2013). En comparación con los equipos diésel, no obstante, conocer los valores de dichas emisiones de calor es vital para el cuidado de las condiciones de trabajo.

### 5.5 Contraste de contaminantes atmosféricos y sus efectos en la salud

Dentro de los principales factores a comparar su impacto en el ambiente laboral es la ventilación, la cual se ve afectada principalmente por las emisiones de diversos gases los cuales en cantidades no controladas pueden ocasionar graves problemas de salud como también las emisiones de calor generadas por los equipos. Dentro de los motores diésel las principales emisiones de estos son; dióxido de carbono, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno (especialmente dióxido de nitrógeno), agua, material particulado diésel (DPM) y calor. Por parte de los equipos eléctricos solo producen una única emisión la cual es calor.

Un informe de Schneider & Hill (2005) estimó que el DPM acorta la vida de casi 21000 personas en los EE. UU. cada año. Varios estudios epidemiológicos específicos de la industria minera subterránea han demostrado un mayor riesgo de cáncer de pulmón debido a la exposición al DPM, además los gases de escape diésel en su conjunto también han sido clasificados por la Agencia Internacional



para la Investigación del Cáncer (IARC) como cancerígenos para los humanos (Grupo 1) desde 2012 (Attfield et al., 2012; IARC: DIESEL ENGINE EXHAUST CARCINOGENIC, 2012).

Otro factor para comparar es el ruido generador por el accionar de los propios vehículos, para lo cual Moore (2010) advierte que el nivel de ruido medio de los vehículos eléctricos es de 85 dB, frente a los 105 dB de los vehículos diésel.

Todas estas emisiones de gases tóxicos presentes en los motores diésel junto con la reducción del ruido, la vibración, las emisiones y el calor de los vehículos eléctricos puede dar como resultado mejores condiciones de trabajo, especialmente bajo tierra.

# Capítulo 6

## Conclusiones

## 6. Conclusiones

En base a la información accedida los equipos eléctricos son el equipo más óptimo en términos de energía y producción si no fuese por sus limitantes dimensionales para los cables o inversión en baterías. Se ha observado que los equipos diésel solo pensado en una evolución de más amigabilidad con el usuario o netamente su capacidad de trabajo autónomo o remoto, pero la cual también se está observando en otros equipos por lo que no se considera un elemento característico de los equipos diésel. La tecnología híbrida presenta en parte una buena mezcla de ambos mundos, pero a criterio de la investigación, no se prevé una continuidad extensa si se mejoran las condiciones de los equipos eléctricos.

En búsqueda de las leyes que promueven la utilización de energías limpias y renovables, la mayor cantidad de estas se dirigen en la actualidad a la producción directa o indirecta de energía eléctrica como se nombra en el punto 5.1.

Por todo lo mencionado anteriormente, se contempla que en la investigación de forma teórica y las variables analizadas se presenta que el equipo eléctrico es un ideal productivo para labores en gran minería, pero con amplias limitantes a los diseños de trabajo, infraestructura, ventilación, entre otros. Todo esto lleva a plantearse si realmente son una buena opción para una operación minera ya establecida o ser utilizados en la evaluación de un proyecto minero futuro.

Debido a los costos de capital mayores presentes tanto en los equipos híbridos como eléctricos es necesario contar con valores cercanos a la realidad tanto para los menores costos de ventilación como lo es por ejemplo requerir menor caudal de aire, es decir, requerir una menor infraestructura como por otra parte el tener contemplado en el diseño de la mina estaciones para la carga y cambio de las baterías en el caso del uso de eLHD con ellas. Si se contempla el uso de eLHD con cable, requeriría un diseño de malla que facilite el movimiento de ellos, no obstante, el uso de este equipo requerirá problemas por fallas en dicho cable las cuales deben contemplarse en medida de lo posible en el análisis económico.

Finalmente, se determinó que los principales factores de comparación entre estos equipos son el impacto en capital inicial dado el mayor costo de los equipos

eléctricos el cual es entre 16% y 20%, y los equipo híbridos para los cuales es de aproximadamente 21%, para esto debe existir un factor que amortigüe dichos costos mayores de inversión e idealmente genere ganancias en comparación a utilizar equipos diésel todo esto para hacer el cambio de tecnología más atractiva para inversores y dueños, dicho factor radicaría en un análisis profundo en los posibles ahorros en temas de ventilación los cuales según las fuente investigadas podría ser entre un 10% - 40% en comparación al equipo diésel, también se tiene la reducción de calor y ruido emitidos por los equipos, además de la notable reducción en las emisiones de gases tóxicos contribuyendo en la salud de los trabajadores. Todo esto podría crea un ambiente laboral más amigable sobre todo al referirse a minería subterránea. En base a lo anteriormente mencionado se espera una mejora en los futuros equipos por parte de los proveedores que trabajan en su desarrollo intentando enfocarse en reducir el costo básico del equipo y mejorando su funcionalidad y eficiencia. Si no hay mejores alternativas disponibles, con el tiempo y la experiencia, es de esperar que la industria pueda aprovechar al máximo esta nueva tecnología y que todas las partes interesadas puedan algún día beneficiarse de su potencial.

# Capítulo 7

## Referencias

## 7. Referencias

- ¿Cómo funcionan los autos eléctricos? | Kia Motors Costa Rica. (2017). KIA. <https://www.kia.com/cr/discover-kia/ask/how-do-electric-cars-work.html#:~:text=“Los autos eléctricos funcionan con,par máximo a velocidades extremadamente.”>
- ABB. (2003). *Motores Eléctricos Trifásicos - 50 y 60 Hz*. <https://siplaser.es/wp-content/uploads/MotoresABB.pdf>
- ABB. (2018). *ABB induction motors for the mining industry*. <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK106834 EN 03-2016&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- ABB. (2022). *Motores de Inducción Modulares Sobre*. <https://new.abb.com/motors-generators/es/motores-de-induccion-de-alta-tension/motores-modulares-de-induccion-de-alta-tension/ficha-técnica>
- Agostini, C., Nasirov, S., Silva, C., & Caceres, G. (2018). Renewable energy transition: a market-driven solution for the energy and environmental concerns in Chile. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20(1), 3–12. <https://doi.org/10.1007/s10098-017-1434-x>
- Atlas Copco. (2006). *Atlas Copco SCOOPTRAM ST 1030*. <https://www.maquinariaspesadas.org/blog/131-manual-scooptrams-st-1030-atlas-copco>
- Attfield, M. D., Schleiff, P. L., Lubin, J. H., Blair, A., Stewart, P. A., Vermeulen, R., Coble, J. B., & Silverman, D. T. (2012). The diesel exhaust in miners study: A cohort mortality study with emphasis on lung cancer. *Journal of the National Cancer Institute*, 104(11), 869–883. <https://doi.org/10.1093/jnci/djs035>
- Baez, F. N. (2016). Seventh International Conference & Exhibition on Mass Mining (MassMin 2016), 9-11 May 2016, Sydney, Australia: Proceedings. *The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne*, 6. <https://doi.org/Unique ID: P201602001> SHARE:
- Barloworld Finanzauto CAT. (2021a). *MOTOR CATERPILLAR C11 INDM ACERT RATING D*. [https://www.finanzauto.es/images/documentos/productos/soluciones\\_energeticas\\_propulsion/industrial/C11\\_INDM\\_IND-002.pdf](https://www.finanzauto.es/images/documentos/productos/soluciones_energeticas_propulsion/industrial/C11_INDM_IND-002.pdf)
- Barloworld Finanzauto CAT. (2021b). *Motor Caterpillar C15 Indm Acert Rating D*. [https://www.finanzauto.es/images/documentos/productos/soluciones\\_energeticas\\_propulsion/industrial/C11\\_INDM\\_IND-002.pdf](https://www.finanzauto.es/images/documentos/productos/soluciones_energeticas_propulsion/industrial/C11_INDM_IND-002.pdf)
- Cargadores eléctricos SANDVIK*. (2021). SANDVIK. <https://www.rocktechnology.sandvik/es-la/productos/cargadores-y-camiones-subterráneos/lhd-subterráneos-eléctricos/>
- Cargadores Subterráneos Diesel SANDVIK*. (2021). SANDVIK. <https://www.rocktechnology.sandvik/es-la/productos/cargadores-y-camiones-subterráneos/equipos-lhd-subterráneos-avanzados/>
- Carrasco, F. (2016). *ASIGNACIÓN DINÁMICA DE OPERADORES DE LHD PARA OPERACIÓN A DISTANCIA EN MINERÍA SUBTERRÁNEA* [Universidad De Chile]. [http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/monografias/GEBIS - RJ/RBG/RBG\\_1995\\_v57\\_n1.pdf%0Ahttps://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/234295](http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/monografias/GEBIS-RJ/RBG/RBG_1995_v57_n1.pdf%0Ahttps://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/234295)

- CAT. (2021a). *Underground Mining Load Haul Dump (LHD) Loaders R1600H*. [https://www.cat.com/en\\_US/products/new/equipment/underground-hard-rock/underground-mining-load-haul-dump-lhd-loaders/18509152.html](https://www.cat.com/en_US/products/new/equipment/underground-hard-rock/underground-mining-load-haul-dump-lhd-loaders/18509152.html)
- CAT. (2021b). *Underground Mining Load Haul Dump (LHD) Loaders R2900*. [https://www.cat.com/en\\_US/products/new/equipment/underground-hard-rock/underground-mining-load-haul-dump-lhd-loaders/15970086.html](https://www.cat.com/en_US/products/new/equipment/underground-hard-rock/underground-mining-load-haul-dump-lhd-loaders/15970086.html)
- CAT. (2021c). *Underground Mining Load Haul Dump (LHD) Loaders R3000H*. [https://www.cat.com/en\\_US/products/new/equipment/underground-hard-rock/underground-mining-load-haul-dump-lhd-loaders/18348371.html](https://www.cat.com/en_US/products/new/equipment/underground-hard-rock/underground-mining-load-haul-dump-lhd-loaders/18348371.html)
- COCHILCO. (2017). Proyección del consumo de energía eléctrica en la minería del cobre 2017-2028. In *OCDE Revisiones de recursos escolares: Chile 2017*. <https://www.cochilco.cl/Listado Temtico/Proyección Consumo EE 2017-2028 v2.pdf>
- Compromiso minero. (2021). *Medio ambiente - Compromiso Minero*. Medio Ambiente. <https://doi.org/10.2307/j.ctv5132b9>
- Cummins Engine Company. (2000). *Manual de Diagnóstico y Reparación Motores Signature, ISX y QSX15*. <http://tddz.org/wp-content/uploads/2016/10/Repair-Manual-Cummins-ISX-QSX15.pdf>
- Cummins Inc. (2010). *QSL9G Gas Compression Manualzz.pdf*. <https://www.cumminsmegamak.com.mx/pdf/productos/d1fe511cb8430caef1079aa636a1cb6b65ce7982.pdf>
- Cummins Inc. (2011). *Powering Productivity Every Engine QSX11.9 And QSX15*.
- Cummins Inc. (2015). *QSL9G Gas Compression Applications Wellhead*. <https://www.cumminsmegamak.com.mx/pdf/productos/d1fe511cb8430caef1079aa636a1cb6b65ce7982.pdf>
- Cummins Inc. (2022a). *Specification Sheet QSX15-G8*. <https://www.cummins.com/g-drive-engines/diesel-qsx15-series>
- Cummins Inc. (2022b). *Specification Sheet QSX15-G9*. <https://www.cummins.com/g-drive-engines/diesel-qsx15-series>
- Cummins MerCruiser Diesel. (2007). *QSL9 Serie de Motores Quantum*. [https://www.touron-nautica.com/descargas/CMD/hojas\\_especif/QSL9\\_HOJA\\_ESPEC.pdf](https://www.touron-nautica.com/descargas/CMD/hojas_especif/QSL9_HOJA_ESPEC.pdf)
- Dartel - SIEMENS. (n.d.). *Motores simotics*. <https://dartel.cl/pub/media/catalogos/motores-siemens-brochure.pdf>
- De Solminihac, H., & Daga. (2018). *PRODUCTIVIDAD MINERA EN CHILE* (H. de Solminihac T. & J. Dagá K. (Eds.); 1st ed.). Ediciones UC. <https://doi.org/10.2307/j.ctvkrkk22>
- Derco Center. (2022). *¿Cómo funciona un motor gasolina?* <https://www.dercocenter.cl/noticias/como-funciona-un-motor-diesel>
- DEUTZ. (2014). *Deutz F12L413 FW*.
- DIGITAL TRENDS. (2021). *¿Qué es un auto híbrido y cómo funciona?* <https://es.digitaltrends.com/autos/que-es-un-auto-hibrido/>
- El Baz, O. (2020). *Mining for Green Energy Green Energy for a more Sustainable Mining*. <https://infomineo.com/mining-industry-in-energy-transition/>
- ElectroMov. (2019). *Electrificación en minería: Retos y beneficios de una nueva forma de operar*. <https://www.electromov.cl/2019/12/20/electrificacion-en->

- mineria-retos-y-beneficios-de-una-nueva-forma-de-operar/  
*Emission Standards EU: Nonroad Engines.* (2016). DieselNet.  
<https://www.dieseln.net/standards/eu/nonroad.php>
- Epiroc. (2017a). *Scooptram ST14 Battery.* <https://www.epiroc.com/es-cl/products/loaders-and-trucks/electric-loaders/scooptram-st14-battery>
- Epiroc. (2017b). *Scooptram ST18.* <https://acortar.link/VD8X5z>
- Epiroc. (2018). *Catologo Scooptram ST7 Battery.* <https://www.epiroc.com/es-cl/products/loaders-and-trucks/diesel-loaders/scooptram-st7>
- Epiroc. (2021a). *Cargadoras eléctricas.* <https://www.epiroc.com/es-cl/products/loaders-and-trucks/electric-loaders>
- Epiroc. (2021b). *Scooptram EST1030.* <https://www.epiroc.com/es-cl/products/loaders-and-trucks/electric-loaders/scooptram-est1030>
- Epiroc. (2021c). *Scooptram ST1030.* <https://www.epiroc.com/es-cl/products/loaders-and-trucks/diesel-loaders/scooptram-st1030>
- Fernandez, F. J. (2019). *Comparación entre diferentes escenarios productivos determinados por simulación de eventos discretos.* Universidad De Talca.
- Ferreyros S.A.A. (2011). *Manual del estudiante.*
- Gallardo, S. (2008). Guía Metodológica de Seguridad para Proyectos de Ventilación de Minas. In *Ministerio de Minería de Chile.* <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/12/200812GuiaVentilacionMinas.pdf>
- Gobierno de Chile - Ministerio de Energía. (2017). *Compromiso público privado por la electromovilidad.*
- Guerrero, A. F. (2017). *Simulación de sistema LHD automatizado mediante eventos discretos - aplicación a minería de Caving Proyecto Nuevo Nivel Mina División El Teniente.* Universidad de Chile.
- Guía Minera de Chile. (2015). *Científicos árabes obtienen litio a partir del agua de mar y con un proceso rentable.* <https://www.guiaminera.cl/cientificos-arabes-obtienen-litio-a-partir-del-agua-de-mar-y-con-un-proceso-rentable/>
- Halim, A., & Kerai, M. (2013). Ventilation requirement for Electric Vehicles in Underground Hard Rock Mines -A Conceptual Study. *The Australian Mine Ventilation Conference, July, 215–220.* <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2504.0088>
- Herrera, J. (2020). Introducción a la Minería Subterránea. Vol. IV: Métodos de explotación de interior. In J. Herrera (Ed.), *Introducción a la Minería Subterránea. Vol. IV: Métodos de explotación de interior: Vol. IV (1ª Edición).* Universidad Politécnica de Madrid. <https://doi.org/10.20868/upm.book.62726>
- IARC: DIESEL ENGINE EXHAUST CARCINOGENIC. (2012). In *Journal of the National Cancer Institute* (Vol. 104, Issue 11). <https://doi.org/10.1093/jnci/djs034>
- Joy Global. (2017). *Hybrid Diesel LHD.*
- Komatsu - JoyGlobal. (2021). *Especificaciones Generales: LT-1050.* <https://mining.komatsu/es/product-details/joy-lt-1051>
- Komatsu Mining Corp. (2019). *Cargadores híbridos Joy 18HD.* <https://mining.komatsu/es/product-details/joy-18hd>
- Martín, J. (2019). *El funcionamiento de un motor de combustión, paso a paso y en*



- vídeo*. Motropasión. <https://www.motorpasion.com/revision/funcionamiento-motor-combustion-paso-a-paso-video>
- Mercedes-Benz. (n.d.). *4R/6R 1000 US Tier4 6R 1100/1300/1500 US Tier 4*.
- Minería Chilena. (2015). *Acciones para mitigar la huella de carbono en minería*. <http://www.mch.cl/reportajes/acciones-para-mitigar-la-huella-de-carbono-en-mineria/>
- Morente, C. (2015). *Análisis y Modelado del Comportamiento de Baterías para Vehículos Eléctricos*. [https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/23050/TFG\\_Carolina\\_Morente\\_Fernandez.pdf](https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/23050/TFG_Carolina_Morente_Fernandez.pdf)
- Perkins. (2015). *Industrial Engine Contents*.
- PMK. (n.d.). *electric motors & brake motors*.
- Qadir, S. A., Al-Motairi, H., Tahir, F., & Al-Fagih, L. (2021). Incentives and strategies for financing the renewable energy transition: A review. *Energy Reports*, 7, 3590–3606. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.06.041>
- ReporteMinero. (2021). *Agua de mar: un actor relevante en la minería chilena*.
- Rojas, G. E. (2017). *Introducción de un LHD híbrido a la industria minera y sus posibilidades en el mercado chileno*. Universidad de Chile.
- Salas, L. (2013). *ESTUDIO DE KPIs EN LOS EQUIPOS DE PERFORACIÓN, CARGUÍO Y ACARREO PARA EL INCREMENTO DE LA PRODUCCIÓN DE 3000 A 3600 TM/DÍA EN LA MINA PALLANCATA - HOCHSCHILD MINING* [Universidad San Agustín de Arequipa]. <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/6925/EDMcccacm.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Sánchez, C. (2006). *Capacitación SANDVIK*. <https://es.scribd.com/doc/271079249/curso-partes-funcionamiento-scooptram-equipos-lhd-sandvick-pdf>
- SANDVIK. (2020). *LH400T*.
- SANDVIK. (2021a). *LH400T*.
- SANDVIK. (2021b). *LH409E*.
- SANDVIK. (2021c). *LH517i*.
- SANDVIK. (2021d). *LH518B*. <https://www.rocktechnology.sandvik/es-la/productos/cargadores-y-camiones-subterráneos/lhd-subterráneos-eléctricos/lh518b-cargador-eléctrico-a-batería/>
- SANDVIK. (2021e). *LH621i*.
- SANDVIK. (2021f). *LH625iE*. <https://www.rocktechnology.sandvik/es-la/productos/cargadores-y-camiones-subterráneos/lhd-subterráneos-eléctricos/cargador-eléctrico-lh625ie/>
- Schneider, C. G., & Hill, L. B. (2005). *Diesel and Health in America : The Lingering Threat* (Issue February).
- Siemens. (2020). Simotics, El portafolio de motores eléctricos más amplio del mundo. *Siemens Ingenuity for Life*, 56. <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:782b04d0-82f4-488a-936b-514cd8bb5d5f/version:1580149154/arteimpressioncatalogosimotics.pdf>

- United States: Cars and Light-Duty Trucks: Tier 2.* (2022). DieselNet. [https://dieselnet.com/standards/us/ld\\_t2.php](https://dieselnet.com/standards/us/ld_t2.php)
- Varaschin, J. (2016). *The Economic Case for Electric Mining Equipment and Technical Considerations Relating to their Implementation.* [http://qspace.library.queensu.ca/bitstream/handle/1974/14825/Varaschin\\_Julian\\_A\\_201609\\_MASC.pdf;jsessionid=D01C89127B46F964500ECB8690C1B9AB?sequence=1](http://qspace.library.queensu.ca/bitstream/handle/1974/14825/Varaschin_Julian_A_201609_MASC.pdf;jsessionid=D01C89127B46F964500ECB8690C1B9AB?sequence=1)
- VEM. (2017). *VEM Motor.*
- VEM - Cosgra S.A. (2008). *Motores asíncronos trifásicos.*
- Volvo: List of Engines.* (2021). Nrcan. <https://www.nrcan.gc.ca/our-natural-resources/minerals-mining/mining-resources/approved-diesel-engines/volvo/8196>
- Volvo Penta. (n.d.). *Volvo Penta: TAD 1342 - 4VE.* [http://www.bektasoglu.net/teknik/ind/t\\_tad1344ve.pdf](http://www.bektasoglu.net/teknik/ind/t_tad1344ve.pdf)
- Volvo Penta. (2013a). *TAD1342VE.*
- Volvo Penta. (2013b). *TAD1344VE.*

# Capítulo 8

## Anexo

# 8. Anexo