



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA ELECTRIFICACIÓN DEL SISTEMA DE
MANEJO DE MINERALES EN MINERÍA SUBTERRÁNEA MASIVA EN LA
INTEGRACIÓN DE GENERACIÓN RENOVABLE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

ELVIS JOSE COVA JIMENEZ

PROFESOR GUÍA:
LUIS ORELLANA ESPINOZA

PROFESORA CO-GUÍA:
ANGELA FLORES QUIROZ

COMISIÓN:
MARCOS ORCHARD CONCHA

SANTIAGO DE CHILE
2023

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO
POR: ELVIS JOSE COVA JIMENEZ
FECHA: 2023
PROF. GUÍA: LUIS ORELLANA ESPINOZA

ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA ELECTRIFICACIÓN DEL SISTEMA DE MANEJO DE MINERALES EN MINERÍA SUBTERRÁNEA MASIVA EN LA INTEGRACIÓN DE GENERACIÓN RENOVABLE

Para que Chile logre contribuir a hacer frente al cambio climático, la industria minera tiene un rol clave en la transición energética del país, debido a que es una de las industrias que más energía eléctrica consume, y este alto consumo energético se ve reflejado en altas emisiones de gases de efecto invernadero, tanto por los vehículos diésel utilizados en la minería, como por la energía eléctrica consumida en los procesos que proviene de fuentes no renovables, todo esto motiva a la industria a transitar hacia una minería baja en carbono. Para lograr este objetivo se requerirá reducir notablemente el uso de combustibles fósiles e integrar masivamente fuentes de energía renovables, razón por la cual, una de las alternativas para la descarbonización del sector minero es la electrificación de los vehículos mineros que utiliza.

El objetivo de este trabajo es analizar el desempeño de equipos mineros eléctricos con respecto a equipos mineros diésel, para contribuir a la integración de generación en base a fuentes de energía renovable, con énfasis en minería subterránea. La metodología para lograr este objetivo es la siguiente: En la primera etapa, se investigan alternativas tecnológicas de electrificación a nivel nacional e internacional, considerando camiones de acarreo eléctricos (UMT) y cargadores LHD eléctricos. La segunda fase consiste en generar un escenario base de la mina y simular la operación de las alternativas seleccionadas, para determinar su consumo energético, poder comparar con vehículos a diésel e identificar oportunidades para integrar generación renovable. Finalmente, en la tercera etapa, se evalúa la posibilidad de abastecer la demanda eléctrica de los vehículos eléctricos con generación solar.

Los resultados obtenidos mostraron que los vehículos eléctricos son una alternativa mucho más sustentable, pues el costo de operación de los vehículos diésel es 202 % más alto y las emisiones son 240 % mayores, además de esto, los vehículos eléctricos tienen el beneficio extra de disminuir las enfermedades ocupacionales de los trabajadores asociadas al aire contaminado por CO₂ y los requisitos de ventilación de la mina, que son de gran importancia, ya que consumen gran cantidad de energía. Finalmente, se pudo observar que no es posible suministrar el 100 % de la energía que requieren los vehículos mineros utilizando únicamente energía solar, debido a que en el intervalo de tiempo entre las 19:00 hrs y 6:00 hrs no se tiene radiación solar, por lo cual si se quiere utilizar únicamente energía renovable es necesario incorporar otros tipos de energía como eólica, hidroeléctrica o incorporar un sistema de almacenamiento de energía.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Estructura del informe	3
2. Marco Teórico y Estado del arte	4
2.1. Minería Subterránea	4
2.2. Método de explotación Block/Panel Caving	4
2.3. Principales equipos de minería subterránea	7
2.3.1. Cargadores LHD	7
2.3.2. Camiones de acarreo subterráneo	8
2.3.3. Equipos de perforación frontal (jumbos)	9
2.4. Electrificación de equipos en minería subterránea	10
2.5. Integración de generación renovable en minería subterránea	15
3. Metodología	18
4. Representación simplificada del sistema de manejo de minerales de minería subterránea	20
4.1. Identificación y caracterización de alternativas tecnológicas existentes	20
4.1.1. Utilización de LHD y UMT eléctricos a batería	25
4.2. Modelo de consumo energético	26
4.2.1. Fuerzas	26
4.2.2. Potencia y energía del vehículo	28
4.2.3. Modelo de batería	29
4.2.4. Potencia de accionamiento hidráulico y potencia auxiliar	29
4.2.5. Resumen de datos utilizados en el modelo	30
4.3. Caracterización de la operación en la mina	32
5. Casos de estudio y resultados	35
5.1. Resultados Simulaciones LHD	35
5.1.1. Simulación Operación LHD a 2 Puntos de Extracción	35
5.1.2. Simulación 1: Operación LHD en Nivel de Producción	37
5.1.3. Simulación 2: Operación LHD en Nivel de Producción	40
5.2. Resultados Simulaciones UMT	45
5.2.1. Simulación Operación UMT con solo dos idas al buzón de carga	45

5.2.2.	Simulación 1: Operación UMT en Nivel de transporte intermedio . . .	47
5.2.3.	Simulación 2: Operación UMT en Nivel de transporte intermedio . . .	50
5.3.	Indicadores de evaluación de desempeño de las alternativas tecnológicas . . .	54
5.3.1.	Costo de operación	54
5.3.2.	Emisiones	56
5.4.	Integración de generación renovable	58
6.	Conclusiones y trabajo futuro	62
	Bibliografía	64

Índice de Tablas

2.1.	Ejemplos de casos de uso de energías renovables en la minería chilena [19]. . .	15
4.1.	Cargadores LHD eléctricos con paquete de baterías integrado ofertados en mercado actual.	21
4.2.	Camiones de acarreo subterráneo eléctricos con paquete de baterías integrado ofertados en mercado actual.	21
4.3.	Datos de entrada a modelo de consumo energético.	31
5.1.	Tiempos de carga utilizados para cada LHD en simulaciones 1 y 2.	36
5.2.	Resultados Simulación 1 de LHD operando en grafo caso base durante 24 [h], bajo condiciones de pendiente hacia puntos de extracción de 0° , 5° y -5°	39
5.3.	Resultados Simulación 1 de LHD operando en grafo caso base durante 24 [h] (peor condición).	40
5.4.	Resultados Simulación 2 de LHD operando en grafo caso base durante 24 [h], bajo condiciones de pendiente hacia puntos de extracción de 0° , 5° y -5°	43
5.5.	Resultados Simulación 2 de LHD operando en grafo caso base durante 24 [h] (peor condición).	43
5.6.	Tiempos de carga utilizados para cada UMT en simulaciones 1 y 2.	46
5.7.	Resultados Simulación 1 de UMT operando en grafo caso base durante 24 [h], bajo condiciones de pendiente hacia puntos de extracción de 0° , 5° y -5°	49
5.8.	Resultados Simulación 1 de UMT operando en grafo caso base durante 24 [h] (peor condición).	50
5.9.	Resultados Simulación 2 de UMT operando en grafo caso base durante 24 [h], bajo condiciones de pendiente hacia puntos de extracción de 0° , 5° y -5°	52
5.10.	Resultados Simulación 2 de UMT operando en grafo caso base durante 24 [h] (peor condición).	53
5.11.	Conjunto de vehículos diésel con características similares a los vehículos eléctricos.	54
5.12.	Características específicas de conjunto de vehículos diésel mineros.	55
5.13.	Estimación de costo de operación de LHD y UMT diésel.	55
5.14.	Estimación de costo de operación de LHD y UMT eléctricos, con carga de batería a bordo y con cambio de batería.	56
5.15.	Estimación de costo de operación de LHD y UMT eléctricos, con carga de batería a bordo y con cambio de batería.	57
5.16.	Resumen de tiempos de carga, descarga y cambio de baterías para cada uno de los LHD y UMT (pendiente 0°).	58
5.17.	Resumen de tiempos de carga, descarga y cambio de baterías para cada uno de los LHD y UMT (peor condición).	59

Índice de Ilustraciones

2.1.	Método de hundimiento por bloques [12].	5
2.2.	Niveles de mina subterránea con método de explotación “Caving” [14].	7
2.3.	Cargador LHD eléctrico de Epiroc modelo ST14 con baterías.	8
2.4.	Camión de acarreo subterráneo de Epiroc modelo MT42 con baterías.	9
2.5.	Perforadora jumbo eléctrica de Sandvik modelo DD422iE	9
2.6.	Comparación de vehículos mineros diésel versus vehículos eléctricos [6].	12
2.7.	Rangos de penetración de energía solar fotovoltaica [20].	16
3.1.	Diagrama de flujo de metodología definida.	19
4.1.	Sandvik Mobile Charging Station.	23
4.2.	Especificaciones de Sandvik Mobile Charging Station.	23
4.3.	Cargador de equipos móviles Caterpillar MEC500.	24
4.4.	Especificaciones cargador de equipos móviles Caterpillar MEC500.	24
4.5.	Diagrama de cuerpo libre camión de acarreo.	26
4.6.	Diagrama de cuerpo libre de Load Haul Dump (LHD).	26
4.7.	Grafo de Caso base de operación del nivel de producción en la mina con 40 puntos de extracción.	32
4.8.	Esquema conceptual de operaciones entre NP y NTI [33].	33
5.1.	Simulación Operación LHD ST7 Battery a 2 Puntos de Extracción.	35
5.2.	Simulación Operación LHD ST7 Battery a 40 Puntos de Extracción.	36
5.3.	Resultados Simulación 1 de potencia instantánea y SOC durante 24 [h] de operación para el LHD ST7 Battery. Punteo azul indica los intervalos de tiempo de descanso.	37
5.4.	Resultados Simulación 1 de potencia instantánea y SOC durante 24 [h] de operación para el LHD ST14 Battery. Punteo azul indica los intervalos de tiempo de descanso.	38
5.5.	Resultados Simulación 1 de potencia instantánea y SOC durante 24 [h] de operación para el LHD R1700 XE. Punteo azul indica los intervalos de tiempo de descanso.	38
5.6.	Resultados Simulación 1 de potencia instantánea y SOC durante 24 [h] de operación para el LHD LH518B. Punteo azul indica los intervalos de tiempo de descanso.	39
5.7.	Resultados Simulación 2 de potencia instantánea y SOC durante 24 [h] de operación para el LHD ST7 Battery. Punteo azul indica los intervalos de tiempo de descanso.	41
5.8.	Resultados Simulación 2 de potencia instantánea y SOC durante 24 [h] de operación para el LHD ST14 Battery. Punteo azul indica los intervalos de tiempo de descanso.	41

5.9.	Resultados Simulación 2 de potencia instantánea y SOC durante 24 [h] de operación para el LHD R1700 XE. Punteo azul indica los intervalos de tiempo de descanso.	42
5.10.	Resultados Simulación 2 de potencia instantánea y SOC durante 24 [h] de operación para el LHD LH518B. Punteo azul indica los intervalos de tiempo de descanso.	42
5.11.	Simulación Operación UMT MT2010 Battery con solo dos idas al buzón de carga.	45
5.12.	Simulación Operación UMT MT2010 Battery con 40 idas al buzón de carga.	46
5.13.	Resultados Simulación 1 de potencia instantánea y SOC durante 24 [h] de operación para el UMT MT2010 Battery. Punteo azul indica los intervalos de tiempo de descanso.	47
5.14.	Resultados Simulación 1 de potencia instantánea y SOC durante 24 [h] de operación para el UMT MT42 Battery. Punteo azul indica los intervalos de tiempo de descanso.	47
5.15.	Resultados Simulación 1 de potencia instantánea y SOC durante 24 [h] de operación para el UMT TH550B. Punteo azul indica los intervalos de tiempo de descanso.	48
5.16.	Resultados Simulación 1 de potencia instantánea y SOC durante 24 [h] de operación para el UMT TH665B. Punteo azul indica los intervalos de tiempo de descanso.	48
5.17.	Resultados Simulación 2 de potencia instantánea y SOC durante 24 [h] de operación para el UMT MT2010 Battery. Punteo azul indica los intervalos de tiempo de descanso.	50
5.18.	Resultados Simulación 2 de potencia instantánea y SOC durante 24 [h] de operación para el UMT MT42 Battery. Punteo azul indica los intervalos de tiempo de descanso.	51
5.19.	Resultados Simulación 2 de potencia instantánea y SOC durante 24 [h] de operación para el UMT TH550B. Punteo azul indica los intervalos de tiempo de descanso.	51
5.20.	Resultados Simulación 2 de potencia instantánea y SOC durante 24 [h] de operación para el UMT TH665B. Punteo azul indica los intervalos de tiempo de descanso.	52
5.21.	Visualización de cambios de batería en gráfica de potencia consumida por un vehículo durante ciclo de operación.	59
5.22.	Perfil de demanda de la red al estar operando el LHD ST7 Battery continuamente durante 24 horas vs Generación diaria promedio de fotovoltaica cercana a Chuquicamata Subterránea.	60

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Cada día son más notables los cambios a largo plazo de las temperaturas y los patrones climáticos, estos cambios son originados por los miles de millones de toneladas de CO₂ que son liberados a la atmósfera como resultado de la producción de carbón, petróleo y gas. La actividad humana es la responsable de la emisión de gases de efecto invernadero, los cuales actúan como una manta que envuelve a la Tierra, atrapando el calor del sol y elevando las temperaturas en la atmósfera y en la superficie de la misma. Las consecuencias de este cambio climático no son solo las temperaturas más cálidas, sino también, sequías intensas, escasez de agua, incendios graves, aumento del nivel del mar, inundaciones, deshielo de los polos, tormentas catastróficas y disminución de la biodiversidad [1].

Para abordar el cambio climático y sus impactos negativos, los líderes mundiales en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP21), firmaron el Acuerdo de París, el cual tiene como objetivo principal reducir sustancialmente las emisiones de gases de efecto invernadero para limitar el aumento de la temperatura global en este siglo a 2 °C y esforzarse para limitar el aumento a menos de 1,5 °C [2].

Chile se comprometió en el marco de su “Contribución Nacional para el Acuerdo Climático de París de 2015” a reducir sus emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en un 30 % por unidad de Producto Interno Bruto (PIB) al año 2030, con respecto al nivel alcanzado en 2007. Además, en 2022 se aprobó la ley marco de cambio climático donde el país se compromete a alcanzar y mantener la neutralidad de emisiones de gases de efecto invernadero en el año 2050 [3].

La industria minera es uno de los pilares de la economía chilena, debido principalmente a las grandes reservas de cobre del país, que convierten a Chile en el mayor productor de cobre en el mundo y a su vez en uno de los mayores productores de gases de efecto invernadero en el país. Adicionalmente, esta industria es de gran importancia para la transición energética del país, debido a que la minería de cobre es un importante consumidor de energía eléctrica (34 % del consumo eléctrico nacional) que en el pasado ha ayudado a impulsar el uso de energías renovables en el país, además, el suministro de cobre es clave y estratégico para lograr la transición energética, ya que es utilizado en diversas tecnologías limpias como: plantas fotovoltaicas, centrales eólicas, vehículos eléctricos, entre otros [4].

La minería de cobre es la responsable del 15,6 % de las emisiones totales de gases de efecto invernadero a nivel país [4]. Por tal razón y debido a las preocupaciones ambientales ya mencionadas, la mayoría de las empresas mineras que están en Chile también han definido metas para disminuir las emisiones [5] y contribuir así con el compromiso adquirido por el país en la Organización de las Naciones Unidas.

Una alternativa prometedora para reducir estas emisiones de gases de efecto invernadero en la industria minera es la electrificación de las operaciones mineras, lo cual puede mejorar la confiabilidad y seguridad de las operaciones, disminuir las enfermedades ocupacionales y, además, de reducir costos operacionales. Gran parte de estos costos mencionados de la minería se deben a la dependencia de combustibles fósiles y fuentes de electricidad generada por gas, por esta razón, realizar una transición hacia el uso de vehículos y maquinaria eléctrica alimentados por energía renovable ya sea parcial o total, va a generar que las operaciones mineras sean más eficientes, sostenibles y seguras [6].

A lo largo del territorio nacional existe gran cantidad de equipos mineros como palas, cargadores LHD, camiones de acarreo y perforadoras jumbo, que utilizan diésel como combustible pero que en un futuro muy cercano podrán ser sustituidos por nuevas versiones que utilicen la electricidad como combustible. Pues, ya en los últimos años se han incorporado con éxito nuevos equipos mineros eléctricos de forma exitosa en diversas minas en todo el mundo [7], [8], [9].

Si bien, electrificar los equipos mineros permitirá disminuir la utilización de combustibles fósiles, es importante reconocer que esta energía eléctrica puede o no, provenir de fuentes de energía contaminantes. Por ello, para lograr una verdadera descarbonización de la industria minera es necesario que la energía utilizada provenga de fuentes renovables. Debido a esto, es importante evaluar la instalación de fuentes de energías renovables para cumplir a cabalidad con el compromiso nacional con el cambio climático.

En el caso particular de la minería subterránea, es importante además, estudiar con mayor detalle las oportunidades de electrificación de los equipos mineros que forman parte del sistema de manejo de minerales, ya que al dejar de utilizar combustibles fósiles, se obtienen beneficios adicionales, tales como la reducción de los costos de ventilación, calefacción y refrigeración, la eliminación del impacto de las partículas de diésel en la salud humana mediante el uso de vehículos eléctricos y el aumento de la seguridad al utilizar maquinaria alimentada por baterías, entre otros.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Analizar el desempeño de equipos mineros eléctricos con respecto a equipos mineros diésel, para contribuir a la integración de generación en base a fuentes de energía renovable, con énfasis en minería subterránea.

1.2.2. Objetivos específicos

- Generar escenario base del sistema de manejo de minerales, mediante la caracterización del estado actual de equipos de minería subterránea masiva, en función de un plan de producción característico.
- Identificar y caracterizar alternativas tecnológicas para la electrificación de equipos mineros del sistema de manejo de minerales en minería subterránea, con potencial de gestión de demanda eléctrica.
- Establecer perfil de demanda/oferta eléctrica en base a simulaciones del ciclo productivo del sistema de manejo de minerales y energía solar disponible.
- Evaluar desempeño de alternativas de electrificación de equipos mineros en términos de costos de operación y emisiones, para la integración de generación renovable.

1.3. Estructura del informe

La estructura del documento presentado se divide en 5 capítulos. El primer capítulo consta de una introducción donde se explicita la motivación del proyecto, el objetivo general y objetivos específicos. En el segundo capítulo se presenta el marco teórico y estado del arte, donde se explican conceptos básicos del tema a estudiar y publicaciones recientes que permiten conocer el estado actual del tema de trabajo. En el tercer capítulo se presenta la metodología, que indica los pasos necesarios para cumplir los objetivos establecidos en base a un cronograma, mientras que en el capítulo 4 se presenta el modelo de consumo energético de vehículos y el caso base de operación en la mina. El capítulo 5 muestra resultados preliminares sobre la operación de los vehículos en el caso base y se realiza una comparación con vehículos diésel, y por último, el capítulo 6 corresponde a una breve conclusión del trabajo realizado y los resultados obtenidos.

Capítulo 2

Marco Teórico y Estado del arte

2.1. Minería Subterránea

La minería subterránea es aquella que se dedica a la explotación de recursos debajo de la superficie de la tierra. En la mayoría de las ocasiones, se llevan a cabo estas explotaciones subterráneas cuando la extracción de los minerales a cielo abierto no es posible, sea por motivos ambientales o económicos [10].

Las explotaciones mineras surgen del descubrimiento de una concentración de mineral bajo tierra, en el caso de la minería subterránea, con un valor económico suficiente como para compensar la construcción de una mina. Las minas subterráneas son la alternativa a las minas de superficie. Las minas de superficie excavan de arriba hacia abajo, un método que puede volverse ineficiente a profundidades superiores a los 60 metros [10].

Todas las minas subterráneas tienen algunos componentes cruciales en común: los ejes de ventilación para eliminar los humos tóxicos de las perforaciones, rutas de escape, ejes de acceso para bajar trabajadores y equipos; túneles de transporte de mineral, pozos de recuperación para llevar el mineral excavado a la superficie y sistemas de comunicación para enviar información de ida y vuelta entre la superficie y los niveles inferiores de la mina [10].

2.2. Método de explotación Block/Panel Caving

Actualmente las excavaciones subterráneas para minería, persiguen los siguientes principios:

- Lograr generar un diseño de explotación que se acomode a la forma del cuerpo mineralizado.
- Maximizar la extracción del mineral de interés, minimizando el movimiento de material estéril o de poco valor económico.
- Poseer la capacidad de desestabilizar y reducir de tamaño las zonas que poseen valor económico (mena) y mantener estables las que actuarán como pilares estructurales del diseño minero.

Existen distintos tipos de métodos de explotación de minas subterráneas: Métodos autosoportados o de caserones abiertos, Métodos soportados o de caserones, Métodos de Subniveles y Métodos de hundimiento por bloques [11].

El hundimiento por bloques es una técnica de producción a gran escala en la que la gravedad se usa junto con las tensiones internas de la roca para fracturar y romper la masa de roca en fragmentos manejables por la maquinaria. El término “Bloque” se refiere al diseño minero en el que el cuerpo mineral se divide en grandes secciones de varios miles de metros cuadrados. Es una técnica de producción a gran escala que es aplicable a yacimientos masivos de baja ley, al observar los casos en el mundo en los que se ha aplicado ésta técnica, se encuentra que ha sido utilizada para extraer mineral de hierro, cobre de baja ley, depósitos de molibdeno y chimeneas de kimberlita con diamante, etc [12].

Existen dos variantes:

Block caving: es un método de explotación masivo en el que un bloque de mineral del cuerpo mineralizado se corta por su base y, a partir de la extracción, se produce la propagación del hundimiento.

Panel caving: es una variante en la que bloques consecutivos se hunden de forma continua para evitar la dilución lateral y los esfuerzos de relajación producidos en el método convencional de block caving.

El hundimiento de la masa rocosa se induce al socavar el bloque por debajo. Este corte de roca inmediatamente subyacente al bloque se consigue por voladura, de tal manera que se consigue que pierda su capacidad de soportar la roca que hay inmediatamente por encima y que ésta empiece a ser objeto de subsidencia, de fracturación y de propagación de dicha fracturación como consecuencia de las fuerzas del peso, que son del orden de millones de toneladas, y que actúan sobre el bloque. La presión continua rompe la roca en pedazos cada vez más pequeños que pasan a través de los puntos de extracción donde el mineral es recogido por medio de equipos LHD [12].

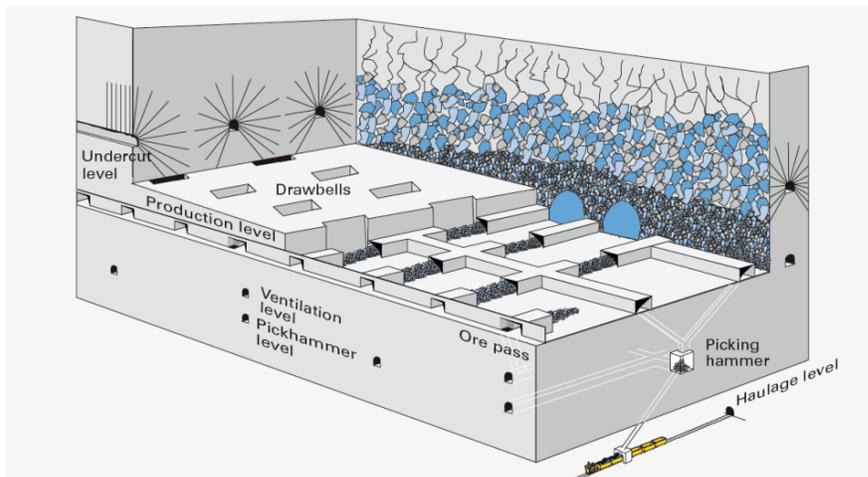


Figura 2.1: Método de hundimiento por bloques [12].

El gran tonelaje producido individualmente por las minas que utilizan el hundimiento por bloques, las convierte en pesos pesados de la minería mundial en términos comparativos. El hundimiento por bloques es un método de extracción en masa económico y eficiente cuando las condiciones de la roca son favorables. La cantidad de perforación y voladura requerida para la producción de mineral es mínima, mientras que el volumen de desarrollo es inmenso. El comportamiento de la masa rocosa y las condiciones para el hundimiento son difíciles de predecir cuándo se realiza el diseño y planificación de la mina.

En los métodos de explotación por “Caving” se pueden identificar distintos niveles de acuerdo a su función dentro de la configuración y las operaciones que se llevan a cabo [13].

Nivel de hundimiento: corresponde al nivel en que se produce la socavación de la columna de mineral, que se logra realizando perforaciones hacia arriba en forma de abanico. Estas se cargan con explosivos, cuya tronadura produce la fragmentación de la base del bloque hasta una cierta altura.

Nivel de Producción: corresponde al nivel de galerías desde las cuales es captado el mineral quebrado y traspasado hacia el nivel siguiente. Se sitúa entre 8 y 18 m. por debajo del nivel anterior, con el cual está comunicado mediante embudos o zanjas según el método de hundimiento.

Nivel de traspaso: corresponde a una serie de galerías y piques que permiten controlar el paso del mineral desde el nivel de producción hasta el nivel de transporte.

Subnivel de ventilación: red de galerías y chimeneas que permiten la extracción e inyección de aire.

Nivel de transporte: nivel por el cual el mineral es transportado hacia la planta ubicada en la superficie.

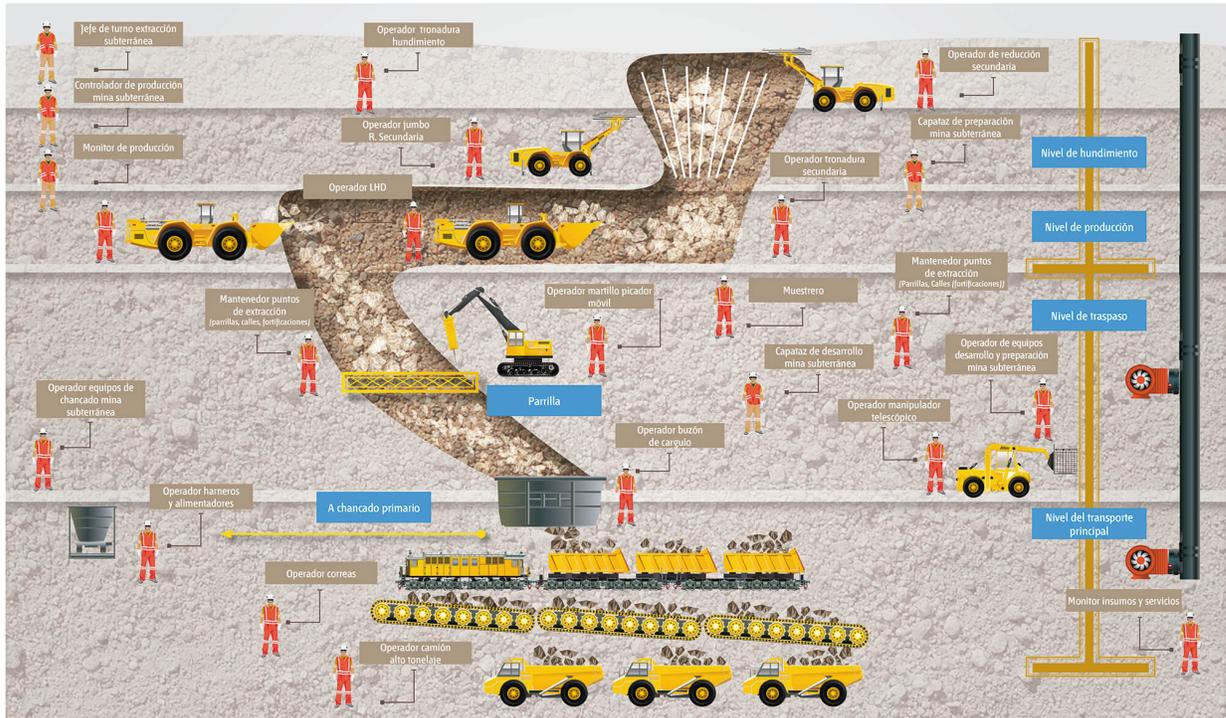


Figura 2.2: Niveles de mina subterránea con método de explotación “Caving” [14].

El mineral es tronado desde el Nivel de Hundimiento (nivel crítico superior) generando la socavación del bloque mineralizada. El material hundido será recibido en el nivel de producción, mediante una batea o zanja que conecta los dos niveles, donde el equipo LHD cargará el mineral desde una estocada de carguío (punto de extracción) y lo transportará por medio de las galerías de producción hasta el punto de vaciado más cercano para regresar al mismo punto de extracción u otro que le fuese asignado y repetir el ciclo [13].

2.3. Principales equipos de minería subterránea

Gran parte del trabajo en minas subterráneas consiste en el arranque de la roca de la corteza terrestre y su posterior traslado o acarreo a otro punto. Para ello, es necesario el uso de camiones y cargadores de tamaño compacto, con la potencia suficiente para ofrecer adecuados niveles de productividad y con bajo costo de mantenimiento. Además para realizar perforación de avance o desarrollos horizontales se requieren equipos jumbos, a continuación se presenta en detalle la función de cada uno de los equipos mencionados.

2.3.1. Cargadores LHD

Los equipos de carga, transporte y descarga denominados LHD (Load Haul Dump) son equipos de bajo perfil usados en la minería subterránea, estos forman una parte integral del proceso productivo, pues se encargan de transportar el material recién dinamitado a los buzones de vaciado. Los LHD cumplen la función de carga, transporte y descarga de mineral hacia los diferentes puntos de extracción. El material puede ser llevado por estos equipos hacia los diferentes puntos de extracción o puede ser sobre otros equipos mineros como los dumpers

(camiones de acarreo subterráneo) que harán traslados más largos en función del diseño de la mina. En la minería subterránea, existen una variedad de tipos, modelos y tamaños de equipos LHD, entre los tipos destacan los LHD eléctricos y diésel. En teoría, estos equipos podrían ser accionados por una de las tres opciones eléctricas: baterías, líneas eléctricas aéreas o líneas trole y por medio de cables arrastre, siendo la última las más común junto con el diésel.



Figura 2.3: Cargador LHD eléctrico de Epiroc modelo ST14 con baterías.

Los principales fabricantes de este tipo de máquinas son Caterpillar, Sandvik, GHH, Atlas Copco, entre otras. Es posible encontrarlas en modalidades de operación manual (con operador en el equipo), tele-comandada (con operador a distancia) y recientemente, en menor cantidad, en modalidad autónoma. El rango de capacidades de carga de esta maquinaria está entre las 3,6 y 22 toneladas.

2.3.2. Camiones de acarreo subterráneo

Los camiones de acarreo se utilizan para el transporte de materiales en minería subterránea. Están especialmente diseñados para realizar labores en minería subterránea, por ello, cuentan con articulación central, altas capacidades de transporte y son de pequeñas dimensiones. Las capacidades de carga útil de estos camiones están entre 20 y 65 toneladas, estos equipos pueden ser eléctricos o diésel.



Figura 2.4: Camión de acarreo subterráneo de Epiroc modelo MT42 con baterías.

2.3.3. Equipos de perforación frontal (jumbos)

Jumbo es el nombre que recibe una unidad de perforación equipada con uno o varios martillos perforadores sobre brazos hidráulicos donde puede montarse un martillo de perforación o una cesta donde pueden alojarse uno o dos operarios y que permite el acceso a cualquier parte del frente. Es una máquina diseñada para realizar labores subterráneas tales como: avance de túneles y galerías, bulonaje y perforación transversal, banqueo con barrenos horizontales y minería por corte y relleno, entre otras [15].

El mecanismo de traslación de los jumbos normalmente es autopropulsado por un tractor montado sobre neumáticos, cadenas o carriles, aunque existen modelos remolcados. Cuando trabajan se estacionan y su accionamiento es eléctrico, aunque pueden disponer de un motor diésel para el desplazamiento. Los martillos perforadores son hidráulicos para conseguir mayores potencias que los neumáticos, funcionando a rotoperCUSión: la barrena gira continuamente ejerciendo a la vez un impacto sobre el fondo del taladro [16].



Figura 2.5: Perforadora jumbo eléctrica de Sandvik modelo DD422iE

2.4. Electrificación de equipos en minería subterránea

La electrificación de las operaciones mineras está emergiendo rápidamente como un tema central para la industria minera y sus esfuerzos para mejorar la confiabilidad, seguridad de las operaciones, condiciones de los trabajadores y para reducir costos. La dependencia del combustible fósil y la electricidad generada por gas es una proporción significativa de los costos operativos actuales de la minería y la prevalencia del uso de combustible diésel es una preocupación importante para la salud de los trabajadores y la seguridad de las operaciones.

El uso de vehículos y maquinaria eléctrica combinados con microrredes alimentadas con energía renovable proporciona un camino hacia operaciones mineras más eficientes, sostenibles y seguras, tanto para la minería subterránea como para la minería a cielo abierto. La digitalización y automatización es también la solución para reducir los costes operativos en áreas relacionadas con la concentración y el transporte. La transición hacia un futuro de minería eléctrica es compleja y requerirá una inversión sustancial en infraestructura, tecnologías y hardware, así como colaboración entre los operadores de minas y las industrias de servicios, las organizaciones de investigación, entre otros [6].

Actualmente las características particulares y los desafíos en la minería [6] se muestran a continuación:

- Sitios mineros, red eléctrica y prácticas de producción en constante evolución debido a los cambios en el paisaje como resultado de la producción de mineral.
- Requisitos adicionales de seguridad de los empleados e impactos ambientales.
- Tipos de minería: superficial o subterránea. Destacar que este informe se enfocará solamente en minería subterránea.
- Producción intensiva en energía.
- Susceptibilidad de las líneas de distribución a las condiciones ambientales.
- Gran variabilidad e imprevisibilidad de las cargas eléctricas.
- Disponibilidad, accesibilidad y sostenibilidad de recursos energéticos (gas, gasolina, renovables) en faenas mineras.
- Dureza del entorno y alteración del paisaje.

En base a estas características se resumen los principales factores que impulsan a la electrificación minera [6] y además se destacan algunas observaciones clave, esto se muestra a continuación:

Mayor consumo de energía y alto costo

- Energía de ventilación: para enfriar y eliminar gases peligrosos en la minería subterránea, que puede representar hasta el 70 % del costo total de operación.
- Cuanto más profunda sea la mina, mayor será el costo de ventilación y enfriamiento.

- Si bien la energía específica de las baterías es mucho menor que la del combustible (13 kWh/kg frente a 250 kWh/kg), los camiones eléctricos usan 1/4 de energía por tonelada transportada en comparación con los camiones diésel.
- Entre el 30-50 % del uso total de energía de una mina es el diésel para los camiones de acarreo.

Baja confiabilidad/calidad de energía y alto costo de mitigación

- Si no está fuera de la red, depende de la confiabilidad de la red principal.
- Los apagones tienen un impacto perjudicial en el proceso de minería, especialmente en las fundiciones.
- Línea de transmisión adicional, actualización y sistemas de mejora de la red (SVC y STATCOM).
- Problemas frecuentes de calidad de la energía debido a las características de arranque y carga de la maquinaria minera, lo que también significa un mayor riesgo para la salud y poca confiabilidad.

Problemas de salud, seguridad y medio ambiente

- Emisiones significativas (DPM) y calor en motores diésel.
- Los motores de combustión tienen serios problemas de salud en la minería subterránea.
- Los equipos/procesos y vehículos eléctricos ofrecen ahorros en costos de ventilación, combustible, consumibles (como respiradores), controles de regulación y mantenimiento.

Cambios de infraestructura y alto costo

- Los sitios de la mina suelen ser remotos con terreno variable, que cambia con la producción de mineral.
- El sistema de apoyo y el suministro de energía deben adaptarse a los cambios topográficos del sitio de la mina, incluidas las subestaciones eléctricas, líneas/cables, transformadores, rieles y enlaces de suministro.
- Altos costos de las medidas de adaptación y los sistemas de asistencia de carros (que requieren un cable aéreo con un costo de infraestructura por camión de alrededor del 75 % del precio total del camión).

Baja productividad

- La maquinaria de minería convencional no es adecuada para la integración oportuna en el proceso de minería, y el monitoreo de los vehículos eléctricos (como el estado de carga y el alcance) puede mejorar la productividad.
- Dificultades y alto costo de transporte y almacenamiento de combustible en lugares remotos.

Altos costos de mantenimiento

- Los vehículos de combustión interna son complejos y requieren un alto mantenimiento y mecánicos altamente calificados.

También se destacan los beneficios de los equipos eléctricos mineros y se muestra una tabla comparativa entre vehículos mineros a diésel versus eléctricos, ver Figura 2.6.

Vehículos Diésel	Vehículos Eléctricos
<ul style="list-style-type: none"> • Baja eficiencia (~35%). • Baja capacidad de sobrecarga. • Alto costo de mantenimiento. • Requiere mecánicos calificados para el mantenimiento. • Precio volátil del diésel. • Dificultades de transporte y almacenamiento de combustible. • Mayor ruido (~105 dB) y vibración. • Puede causar la formación de niebla. • Alta generación de calor. • Difícil de construir autónomo. • Alto número de componentes y baja confiabilidad. • Difícil para la recopilación de datos y el monitoreo remoto. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta eficiencia eléctrica del motor (>95%). • Alta capacidad de sobrecarga. • Cero emisiones locales (evitando un sistema de ventilación grande y ruidoso y la consiguiente baja ventilación, combustible, consumibles, controles de regulación y costos de mantenimiento). • Baja generación de calor. • Bajo costo de energía kWh. • Bajo mantenimiento. • Menor ruido (~85 dB) y vibración. • Plataforma ideal para sistemas autónomos (incluida la recarga). • Componentes modularizados y alta fiabilidad. • Fácil de obtener datos de monitoreo.
<ul style="list-style-type: none"> • Mayor rango de operación. • Alta energía específica del combustible, ~13kW/kg. • Menor costo de capital (debido a la producción en masa establecida). • Reabastecimiento de combustible rápido y fácil. 	<ul style="list-style-type: none"> • Rango operativo limitado. • Requiere diferente infraestructura de abastecimiento de combustible (carga). • Batería de energía de "combustible" específica baja (~250 W/kg). • Actualmente recarga lenta. • Duración limitada de la batería. • Mayor costo (pero muy probable que se reduzca con la producción en masa y una mayor competencia y nuevos dispositivos electrónicos de potencia).

Figura 2.6: Comparación de vehículos mineros diésel versus vehículos eléctricos [6].

La creciente disponibilidad de tecnologías, maquinaria, vehículos e infraestructura de electrificación específicos o adaptables a la mina brindan una oportunidad tanto para las empresas de recursos como para la industria de servicios de apoyo para abordar las crecientes presiones económicas, ambientales y sociales para reducir las emisiones de carbono y ayudar en la transición hacia un futuro de minería eléctrica.

En la referencia [17] se realiza una comparación entre los vehículos de carga y acarreo que utilizan diésel versus los que utilizan electricidad, muy similar a la presentada en [6]. Sin embargo, en esta comparación se clasifican los vehículos eléctricos según la forma en que se

suministra la energía eléctrica a sus motores: los que utilizan paquetes de baterías integrado, los que utilizan cable de alimentación, los que se alimentan con una línea de tranvía aérea, y los que utilizan híbridos eléctricos.

Los cargadores LHD y camiones que funcionan con baterías tienen grandes ventajas, pero tienen el problema de que sus baterías tienen una baja energía específica permitiendo que operen en promedio 4 horas, lo cual está muy por debajo de la duración de un turno de trabajo, si bien es posible cambiar la batería en 15 minutos, cambios frecuentes de batería afectarían negativamente la disponibilidad de equipo. A pesar de esto, esta tecnología sigue siendo prometedora ya que la tecnología de baterías puede progresar significativamente [17].

Los cargadores accionados por cable han demostrado ser efectivos en varios escenarios mineros y obtienen más reconocimiento en varios países, sin embargo, el rango operativo limitado, la vulnerabilidad de los cables de alimentación y la incapacidad de operar más de un cargador en un área de mina determinada, hacen que su aplicabilidad permanezca limitada a algunos escenarios mineros particulares. Los camiones eléctricos impulsados por troles merecen más consideración en los casos de minas futuras y existentes con transporte de camiones a través de rampas largas. Si bien la solución no es universal, tiene el potencial de ser beneficiosa en algunas aplicaciones particulares [17].

En cuanto a los vehículos híbridos diésel-eléctricos, estos combinan un sistema de propulsión convencional con un sistema de almacenamiento de energía recargable a bordo para lograr una mejor economía de combustible que un vehículo convencional sin verse obstaculizado por el alcance de una unidad de carga como un vehículo eléctrico de batería. Esta tecnología avanza en el transporte por carretera pero no ha tenido éxito en las minas subterráneas. Es difícil predecir si puede llegar a ser realmente competitivo, incluso en un horizonte de mediano plazo con respecto a los trenes de potencia diésel y eléctricos existentes [17].

Los vehículos eléctricos, aún con todos sus inconvenientes, ofrecen importantes beneficios, particularmente en lo que respecta a los aspectos de salud de trabajadores, seguridad y medio ambiente, lo que hace que la minería subterránea profunda sea más sostenible. A medida que la tecnología progresa en varios campos relacionados, el atractivo de dichos vehículos debería aumentar, particularmente si se reducen aún más sus costos de adquisición y operación.

En cuanto al impacto ambiental de los vehículos eléctricos, definitivamente es menor que en el caso de los motores diésel, pero depende de la forma en que se genera la energía eléctrica, si proviene de fuentes renovables como el viento o la radiación solar, el impacto ambiental es despreciable. Otro ejemplo puede ser el caso de Francia donde el 80% de la electricidad proviene de centrales nucleares, permitiendo que las emisiones de CO₂ asociadas al uso de un vehículo eléctrico sean notablemente inferiores a las de los diésel.

Por otra parte, en la referencia [18] se analiza la operación de un camión de acarreo eléctrico con baterías dentro de una mina subterránea, se estudia la operación del vehículo bajo distintas capacidades de batería, considerando opciones de carga rápida y cambio de baterías, los resultados se centran en la productividad y los costos. Se menciona que los avances recientes en la tecnología de baterías han dado lugar a baterías que tienen densidades de potencia y energía lo suficientemente altas como para hacer que los vehículos mineros eléctricos

alimentados por batería no solo sean viables sino también económicamente ventajosos.

Los camiones de acarreo utilizan la mayor parte de la energía de la flota minera subterránea, por ello, son un candidato principal para la electrificación y el enfoque de la referencia [18]. Un gran desafío es determinar el esquema óptimo de recarga de la batería, siendo las dos opciones principales la carga rápida y el cambio de batería, considerando que es importante minimizar el tiempo de inactividad de los camiones para recargar, ya que los operadores de la mina se esfuerzan por maximizar la producción diaria de mineral, que está directamente relacionada con la operación de los camiones de acarreo.

La carga rápida requiere una infraestructura eléctrica costosa y genera pérdidas y calor, pero puede reducir el tiempo de inactividad de carga con tasas de carga más altas. El intercambio de baterías generalmente requiere la instalación de una infraestructura de intercambio costosa en la mina y puede triplicar la cantidad de paquetes de baterías que se deben comprar, pero reduce las pérdidas de carga ya que las baterías se pueden cargar lentamente y pueden lograr altas tasas de carga efectivas [18].

En términos de productividad, el intercambio de baterías solo es beneficioso si se utilizan paquetes de baterías grandes para reducir la cantidad de cambios necesarios por turno. Los resultados de [18], muestran que el cambio de batería con la batería de 228 kWh ofrece prácticamente la misma productividad que la carga rápida de 600 kW con la batería de 228 kWh.

El caso de la mina examinado en la referencia [18] utiliza cinco camiones de volteo y tres cargadores LHD para una mina típica de 2500-3000 toneladas por día; por lo tanto, ocho unidades necesitarán una carga rápida o un cambio de batería. Para el cambio de batería se consideran tanto los packs de 228 kWh como los de 348 kWh ya que el primero daba una productividad igual a 600 kW carga rápida, y el último dio la máxima productividad de los casos considerados. Para cambiar la batería, se requieren tres lotes de baterías: un lote está en los camiones de conducción, un lote se está cargando (a 150 kW) y un lote está cargado y enfriando esperando. Para la estación de intercambio de baterías se requiere que un operador de la estación mueva las baterías descargadas, cargadas y enfriadas para garantizar que una batería esté lista cada vez que un camión se detenga para un intercambio.

Para los escenarios analizados en [18], los resultados mostraron que el cambio de batería con paquetes de 228 kWh es un 48 % más costoso que la carga rápida durante el período de 5 años considerado, pero ofrece prácticamente la misma productividad que la carga rápida con paquetes de 228 kWh. La opción de intercambio de batería con el tamaño de batería más grande posible por masa, 348 kWh, brinda una productividad un 2,8 % mayor que la mejor opción de carga rápida (228 kWh), pero a un costo de \$2,764 [MUSD] más que la carga rápida, un aumento del 65 %. Gran parte de los costos más elevados relacionados con el cambio de batería se derivan de tener que comprar varios lotes de baterías (incluso para tipos de celdas de menor costo) y mano de obra para administrar el cambio de batería.

Se encontró que solo la tasa de carga rápida más alta (600 kW) brindó resultados de productividad comparables a los escenarios de intercambio de baterías con baterías grandes. Por lo tanto, se obtuvo que carga rápida de 600 kW de camiones eléctricos subterráneos es un método rentable que también brinda una alta productividad [18].

2.5. Integración de generación renovable en minería subterránea

La minería del cobre juega un papel crucial en la transición hacia una energía más sostenible en varios aspectos, pues impulsa la adopción de fuentes de energía limpias en el país y proporciona la materia prima esencial para el funcionamiento de tecnologías limpias, como la energía solar, eólica y la electromovilidad, entre otras. Por ello, el suministro de cobre se convierte en un factor estratégico de vital importancia para lograr con éxito la transición hacia una matriz energética más respetuosa con el medio ambiente, tanto en Chile como en el mundo.

En los últimos años se ha logrado integrar energías renovables a las operaciones mineras de la minería de cobre mediante 3 formas [19]:

- La minera desarrolla proyectos de energía renovables y los integra directamente en algún proceso.
- La empresa minera realiza un contrato de compra de energía (Power Purchase Agreements) con un generador donde este garantice que la energía provenga de fuentes limpias.
- La empresa minera realiza un contrato de compra de energía con un generador donde este garantice que la energía provenga de fuentes limpias, pero además participa en la inversión del proyecto de energías limpias.

De estas formas de integración de energía renovable, la más común es la de comprarle la energía a un generador sin participar en la inversión de los proyectos, en la Tabla 2.1 se muestran algunos ejemplos en Chile.

Tabla 2.1: Ejemplos de casos de uso de energías renovables en la minería chilena [19].

Minas integrando energías renovables	Proyecto de energías renovables	Tipo de Integración	Descripción
Los Pelambres, AMSA	Planta Fotovoltaica Javiera	PPA	69,5 MW, cubriendo ~ 15% de las necesidades energéticas.
Los Pelambres, AMSA	Planta Fotovoltaica Conejo Solar	PPA	104 MW, cubriendo ~ 20% de las necesidades energéticas.
División Chuquicamata, Codelco	Energías Renovables ENGIE	PPA 11 años	Contrato de 200 MW (1.500 GWh/año) que proveerá a partir del 2021 comenzando con el 70% de las necesidades de electricidad de operación con energías renovables.
Salvador, Andina, Ventanas y Teniente Codelco	Energías Renovables Colbún	PPA 18 años	Contrato firmado en 2022 que suministrará 1.000 GWh/año con energías renovables a partir del 2026.
Caserones	Energías Renovables ENEL	PPA 17 años	Contrato que proveerá a partir del 2021 el 100% de las necesidades de electricidad de la operación con energías renovables.

De los ejemplos mostrados en la Tabla 2.1, se puede notar que en las minas donde se integró únicamente proyectos fotovoltaicos, estos satisfacen menos del 30% de las necesidades

energéticas e la mina, mientras que en las minas donde se integran un conjunto de proyectos de energías renovables, como solar, hidroeléctrica y eólica, es posible suplir más del 70 % de las necesidades energéticas de la mina. Claramente la ubicación geográfica de la mina es clave, debido a que es necesario que se encuentren desarrollados diversos proyectos de energía renovable en las cercanías de esta y suficiente capacidad en las líneas de transmisión, para lograr abastecer sus necesidades energéticas de una forma limpia.

La integración de generación renovable en la minería del cobre, no sólo permite disminuir de costos de la energía necesaria para las operaciones, sino que también le da una plusvalía al cobre, debido a que la producción es mucho mas sustentable, contribuyendo a la reducción de gases de efecto invernadero (GEI). Esto mejora la reputación de las empresas mineras y atrae a nuevos inversores y consumidores, que buscan reducir su huella de carbono [19].

Las operaciones mineras se caracterizan por necesitar una alimentación de energía constante durante las 24 horas del día, por esta razón al integrar energía solar y eólica, existe la problemática de que al ser intermitentes y tener un bajo factor de planta (inferiores a 40 %), se requiere acompañarlas con energías convencionales, como hidroeléctrica o combustibles fósiles.

Para que una solución de energía renovable funcione, debe integrarse a la perfección con las condiciones de suministro de energía existentes para no interrumpir el modelo de negocio de la mina. En las operaciones de minería conectadas a la red puede ser factible realizar operaciones con una alta penetración de energías renovables, ya que es posible compensar las horas en que no hay radiación solar y el viento es mínimo. En la Figura 2.7 se pueden observar distintos niveles de penetración de energía solar fotovoltaica para abastecer una demanda.

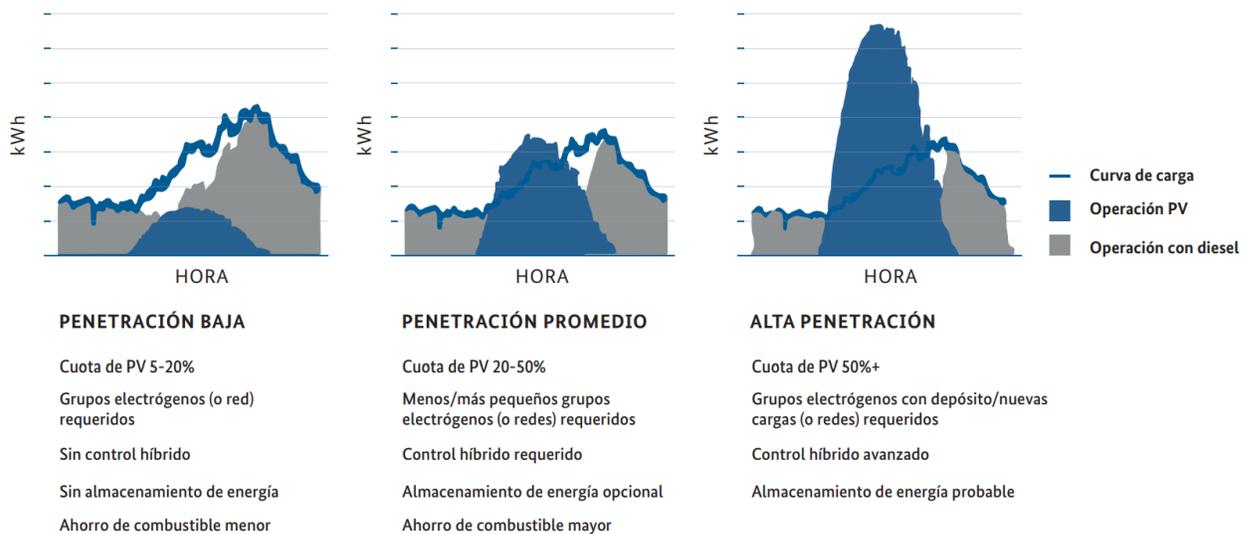


Figura 2.7: Rangos de penetración de energía solar fotovoltaica [20].

Se puede observar en la Figura 2.7, que cuando la cuota de energía solar es menor al 20 %, no hace falta agregar sistemas control ni almacenamiento de energía, la incorporación de esta cantidad de energía solar permite que los generadores diésel trabajen menos, ahorrando

diésel. Si la cuota de energía solar es mayor a 20 % se hace necesario incorporar un sistema de control, si esta cuota sobrepasa el 50 % será conveniente agregar sistemas de almacenamiento, para aprovechar la generación solar. En estos casos donde la cuota de energía solar es mayor al 20 % se tiene un ahorro de diésel considerable.

En ciertos lugares es posible conseguir perfiles de generación solar y eólica que se complementan, permitiendo aumentar la cuota de integración de generación renovable. En otros casos donde además se tiene disponibilidad de generación hidroeléctrica, es posible que la cuota de integración de ER sea 100 %.

Un ejemplo de esto mencionado es la mina Zaldívar ubicada en el norte de Chile, el proyecto firmó un acuerdo de compra de energía por 10 años con la compañía chilena de electricidad Colbún, para convertirse en la primera mina de cobre del mundo en obtener energía 100 % renovable a partir de fuentes de energía hidroeléctrica, solar y eólica.

Capítulo 3

Metodología

El trabajo a desarrollar en la memoria consiste en analizar cual es el impacto de la electrificación de los equipos mineros, principalmente camiones de acarreo y cargadores LHD, en el sistema de manejo de minerales en minería subterránea masiva, en la integración de generación renovable, con énfasis en la fuente solar. Esta memoria busca principalmente dar respuesta a las siguientes preguntas:

1. ¿Cuáles son las tendencias y desafíos para la electrificación de los camiones de acarreo y cargadores LHD en minería subterránea?
2. ¿Cuál es el potencial de gestión de demanda eléctrica de las alternativas existentes para la electrificación de equipos mineros?
3. ¿Es posible que la tecnología actual de electrificación pueda sustituir a los modelos a diésel en camiones de acarreo y cargadores LHD?
4. ¿Se puede suplir el 100% de la demanda energética de los equipos eléctricos mineros con solo incorporar generación fotovoltaica?

Para alcanzar los objetivos planteados de este proyecto, se tiene una metodología de investigación dividida en 7 partes que se muestran en la Figura 3.1. Inicialmente se realizará una lectura bibliográfica para conocer cual es el estado actual de la electrificación de equipos en minería subterránea e investigar sobre experiencias donde se haya integrado fuentes de energía renovable en minería. Luego se procederá a identificar alternativas tecnológicas para la electrificación de equipos en minería subterránea, en esta parte se investigarán las alternativas de electrificación de equipos en minería subterránea implementadas o planificadas para entrar en operación a nivel nacional e internacional. Entre las alternativas se considerarán solamente camiones eléctricos y cargadores LHD eléctricos, para cada alternativa se realizará un análisis preliminar del potencial de gestión de demanda eléctrica, considerando restricciones operacionales y capacidad de almacenamiento de energía. Luego en base al análisis, se seleccionará un conjunto de alternativas considerando su potencial de gestión de demanda.

Teniendo claro este conjunto de alternativas a utilizar, se procederá a generar un escenario base del sistema de manejo de minerales esto con el objetivo de poder realizar simulaciones de operación de los vehículos eléctricos seleccionados, permitiendo visualizar los perfiles de demanda eléctrica de referencia en cada equipo e identificar donde hay oportunidades para

gestionar la demanda; el modelo considerará restricciones de operación de las diversas tecnologías.

Con los resultados de las simulaciones de operación se procederá a evaluar el desempeño de las alternativas de electrificación, esto se realizará comparando el conjunto de vehículos eléctricos seleccionados con vehículos similares que utilicen diésel, en términos de costos de operación, emisiones y factibilidad técnica. Finalmente se analizarán los resultados de esta comparación, para concluir sobre su desempeño y si realmente es posible gestionar la demanda eléctrica de estos vehículos para contribuir a la integración eficiente de generación renovable.

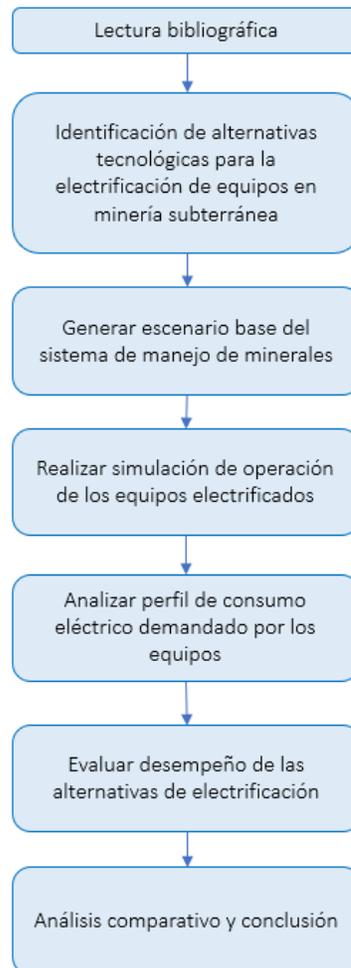


Figura 3.1: Diagrama de flujo de metodología definida.

Capítulo 4

Representación simplificada del sistema de manejo de minerales de minería subterránea

En este capítulo inicialmente se identificarán alternativas tecnológicas disponibles en el mercado para electrificar equipos mineros subterráneos, específicamente camiones de acarreo y LHD, que utilizan baterías. Luego se desarrollará un modelo base de la operación de las alternativas tecnológicas, considerando una operación siguiendo el patrón actual, es decir, sin incluir estrategias para gestionar la demanda eléctrica. Con este modelo se podrá determinar los perfiles de demanda eléctrica de referencia de cada equipo utilizado, permitiendo identificar el potencial de gestión de la demanda eléctrica de estos vehículos.

Luego de esto, se realizará una comparación de los perfiles de demanda eléctrica de los vehículos con un perfil de oferta de generación solar, para analizar la posibilidad de poder abastecer la demanda con generación solar. Previo a desarrollar el modelo base de operación en la mina, se construirá un modelo de consumo energético para las alternativas tecnológicas, cuyas variables de entrada serán la distancia del tramo a recorrer, la pendiente de la superficie, la carga en toneladas y la velocidad, con esto se podrá obtener la energía consumida en [kWh/km] y el estado de carga de la batería al finalizar el recorrido (SoC).

Además en base a las simulaciones se analizará la cantidad de baterías requeridas para operar con el mayor tiempo efectivo de trabajo posible, y con ello, realizar una comparación de costos y emisiones con respecto a vehículos similares que utilizan diésel.

4.1. Identificación y caracterización de alternativas tecnológicas existentes

En base a las referencias [6], [17] y [18], se procedió a investigar en el mercado actual cual es la oferta de camiones de acarreo subterráneos y cargadores LHD, eléctricos que utilizan paquetes de baterías integrado. Los principales fabricantes revisados fueron: Caterpillar, Epiroc (Grupo Atlas Copco), Komatsu y Sandvik.

Tabla 4.1: Cargadores LHD eléctricos con paquete de baterías integrado ofertados en mercado actual.

Equipo	Load Haul Dump (LHD)			
Fabricante	Epiroc	Epiroc	Caterpillar	Sandvik
Modelo	ST7 Battery	ST14 Battery	R1700 XE	LH518B
Capacidad de carga útil [ton]	6,8	14	15	18
Capacidad batería [kWh]	165	300	213	353
Tiempo de carga o potencia	Carga de 65 kW	1 h y 50 min	Carga 500-840kW (30 min)	Carga 640 kW (1 h)
Capacidades de Balde [m3]	2,3-3,8	4,7-7,8	5,7-7,5	6,3-8,6
Modo de Carga	A bordo o cambio de batería (12 min)	A bordo o cambio de batería (12 min)	Ultra Fast Charge A bordo	Self swapping (5 min)
Dimensiones Vehículo [mm]	8894x2280x2159	10865x3040x2601	N/D	11228x2872x2565
Peso Vehículo [ton]	21,5	42	48,75	52
Dimensiones Batería [mm]	N/D	N/D	N/D	N/D
Peso Batería [ton]	N/D	4,2	N/D	9,95

En la Tabla 4.1 se pueden observar 4 alternativas de cargadores LHD eléctricos a batería de los fabricantes Epiroc, Caterpillar y Sandvik, las capacidades de carga útil son muy similares y las diferencias entre estos esta principalmente en las capacidades de la batería, potencia de carga y modo de carga.

Tabla 4.2: Camiones de acarreo subterráneo eléctricos con paquete de baterías integrado ofertados en mercado actual.

Equipo	Underground Mining Truck (UMT)			
Fabricante	Epiroc	Epiroc	Sandvik	Sandvik
Modelo	MT2010 Battery	MT42 Battery	TH550B	TH665B
Capacidad de carga útil [ton]	20	42	50	65
Capacidad batería [kWh]	165	375	354	354
Tiempo de carga o potencia	Carga de 65 kW	3 horas	540 kW	600 kW
Capacidades de Balde [m3]	6,7-11	16-23	24-31	32-40
Modo de Carga	A bordo o cambio de batería (12 min)	A bordo o cambio de batería (12 min)	Self swapping (5 min)	Self swapping (5 min)
Dimensiones Vehiculo [mm]	9264x2435x2511	10945x3095x2689	11055x3348x2891	11600x3500x3600
Peso Vehiculo [ton]	24,4	37,7	49,6	56,4
Dimensiones batería [mm]	N/D	N/D	1800x2130x1680	1800x2130x1681
Peso batería [ton]	N/D	4,95	8,26	8,26

En la Tabla 4.2 se pueden observar 4 alternativas de camiones de acarreo subterráneo eléctricos a batería de los fabricantes Epiroc y Sandvik, las capacidades de carga útil y potencia de carga son notablemente mayores en los equipos de Sandvik, los cuales además cuentan con un novedoso modo de carga llamado Self swapping.

Es importante destacar que actualmente Komatsu no cuenta con camiones de acarreo subterráneo o cargadores LHD que sean eléctricos con baterías [21], pues solamente ofrecen equipos que utilizan cable de alimentación y los equipos a batería que ofrece esta empresa son para minería de superficie.

Con el objetivo de comprender las ventajas y desventajas de los modos de carga de los diversos fabricantes, se especificará por fabricante:

Epiroc: este fabricante utiliza baterías de Litio LiFePO₄ en sus BEV mas antiguos que son el LHD ST7 Battery y UMT MT2010 Battery, en sus BEV mas nuevos LHD ST14 Battery y UMT MT42 Battery utilizan baterías de Li-ion NMC las cuales tienen una energía específica mayor a las de litio fostato de hierro, permitiendo almacenar la misma energía en un espacio menor y con menor peso. Esto mencionado se puede ver claramente al comprar las baterías del MT42 Battery con la del TH550B.

Al investigar sobre baterías de Epiroc, no se encontró mucha información sobre potencia de carga, dimensiones de la batería, peso de la batería, entre otros. En las especificaciones de sus BEV se deja claro que se puede cargar el vehículo con la batería a bordo o mediante el cambio de batería, esta última opción requiere de una inversión notable en infraestructura para instalar una grúa que mueva las baterías [22]. Con respecto a la potencia de carga, se tiene muy poca información pues solamente se especifican tiempos de carga y no se menciona la opción de carga rápida.

El fabricante también ofrece un servicio llamado “Batteries as a Service” (BaaS) en donde Epiroc trabaja directamente con el cliente para definir un plan de batería que se adapte a las necesidades de su operación. La vida útil está garantizada y el estado de la batería se controla cuidadosamente para garantizar un mantenimiento predictivo con un tiempo de inactividad reducido. Si un cliente desea aumentar o disminuir su capacidad, puede ajustar su plan y el servicio se adaptará a sus necesidades. Epiroc retirará las baterías viejas del sitio y las reemplazará por nuevas, estas baterías más viejas luego se usan para aplicaciones secundarias y se reciclarán al final del proceso [23].

Sandvik: este fabricante cuenta con el más innovador modo de carga llamado “Self swapping”, el cual consiste en que el vehículo por si mismo es capaz de desmontar la batería utilizada y recoger una nueva batería cargada en la estación de carga, esto puede ser realizado en un tiempo inferior a 5 minutos y requiere una mínima manipulación manual por parte del operador [24]. Esto es posible debido a que los equipos de Sandvik cuentan con una batería extra llamada “tramping battery” de 25 [kWh], que solo se utiliza al desconectar la batería principal.

La estación de carga de Sandvik es llamada “Mobile Charging Station”, la cual cuenta con una unidad de enfriamiento y 2 unidades de carga, las especificaciones de estas unidades se muestran a continuación:



Figura 4.1: Sandvik Mobile Charging Station.

MOBILE COOLING UNIT

Enclosure dimensions	L: 1550 mm W: 1550 mm H: 1600 mm
Weight	1100 kg
Operating temperature and relative humidity	+10 - +40 °C, 100%
Refrigerant	R134a
Amount of refrigerant	16 kg
Input voltage	400 VAC (50 and 60 Hz)
Electric input power	43.6 kVA
Liquid cooling power	60 kW
Thermal load to environment	Up to 104 kW
Coolant	Low electrical conductivity coolant (40% raw ethylene glycol, 60% distilled water). Other mixture ratios can be used, but it will affect cooling capacity.
Coolant volume	60 l (50 l tank + 10 l internal system)
Ingress protection	IP54

MOBILE CHARGING UNIT

Enclosure dimensions	L: 1550 mm W: 1550 mm H: 1600 mm
Weight	2100 kg
Operating temperature and relative humidity	+10 - +40 °C, 100%
Input voltage (50 and 60 Hz)	480/600/1000 VAC
Electric input power	400 kVA*
Charging power	320 kW
Output voltage	Min. 480 VDC Max. 850 VDC Full power 500..750 VDC
Ingress protection	IP54

*with current battery pack maximum input power 245kVA per charging unit

Figura 4.2: Especificaciones de Sandvik Mobile Charging Station.

Se destaca que se tiene la opción de cargar un batería con 2 unidades de carga en aproximadamente 1 hora o cargar 2 baterías en el doble de tiempo.

Caterpillar: esta empresa ofrece un modo de carga distinto con respecto a los otros fabricantes, pues para su LHD no se tiene la opción de cambiar baterías, solo la opción de carga ultra rápida la cual demora 30 minutos si se utiliza un modulo de carga o 20 minutos si se utilizan dos en paralelo, el modulo de carga que ofrece Caterpillar es el MEC500 el cual permite cargar la batería con una potencia de 500 kW y en caso de usar dos módulos con una potencia de 840 kW [25]. En las siguientes figuras se muestra el modulo de carga y sus especificaciones.



Figura 4.3: Cargador de equipos móviles Caterpillar MEC500.

PRODUCT SPECIFICATIONS FOR MEC500		CAT	
Rated Power (AC Input)	500 kW	Ambient Operating Temperature Range	-25° to +50° C (-13° to 122° F)
Voltage Range (AC Input)	400-660 VAC	Storage	-40° to +80° C (-40° to +176° F)
Frequency Range	50 or 60 Hz	Control interface	CAN
Input Supply (AC Input)	3-Phase Insulated Terra (IT)	Control Type	IEC 61851-23/24 (with CAN)
Voltage Output	300-1,000 VDC	Compliance and Safety	CSA M421; UL2202 (under development)
Rated Current (DC Output)	700 Amps		
Cable Output - Cat Proprietary Connector	700 Amp	MEC500	1656 kg
		MEC500 with Optional Skid	2037 kg

Figura 4.4: Especificaciones cargador de equipos móviles Caterpillar MEC500.

Este modo de carga tiene la ventaja de que no requiere que se compren baterías extras, con el costo de que el equipo se mantendrá fuera de operación 10-25 minutos mas que los equipos de la competencia y la vida útil de la batería será menor a la de otros fabricantes debido a la carga rápida.

4.1.1. Utilización de LHD y UMT eléctricos a batería

Al investigar en que minas se utilizan los equipos mostrados en las Tablas 4.1 y 4.2, se obtuvo lo siguiente:

- El modelo Sandvik *TH665B* actualmente es un prototipo que se encuentra en fase de pruebas en una fábrica en California. Se espera que se ponga a revisión en la mina de oro Sunrise Dam (Australia), propiedad de la compañía AngloGold Ashanti; donde demostrará su viabilidad en una aplicación de transporte de rampa larga; y de acuerdo con esos resultados, se procederá a la producción comercial del Sandvik *TH665B* hacia finales del 2023 [26].
- En noviembre de 2022, Codelco estrenó el LHD *ST14 Battery* en la mina subterránea Diabolo Regimiento de División El Teniente, siendo el primer equipo de estas características que operará en Sudamérica [8].
- En mayo de 2022, Sandvik suministró tres camiones *TH550B* y un cargador *LH518B* a la mina Sindesar Khurd de Hindustan Zinc. Sandvik también les proporcionó baterías, sistemas de carga y un equipo de soporte [27].
- La minera de oro Agnico Eagle se encuentra estudiando los beneficios de seguridad, eficiencia y sostenibilidad de la tecnología de baterías eléctricas probando una cargadora subterránea Sandvik *LH518B* en su mina de oro de Fosterville desde 2022, indican que la característica más atractiva es la tecnología AutoSwap de Sandvik que permite descargar una batería agotada y cargar una completamente cargada en tan solo seis minutos, sin necesidad de infraestructura de elevación [9].
- En marzo de 2021, la minera sueca LKAB ordenó que se prueben los vehículos eléctricos de Epiroc para futuras operaciones libres de CO₂, El pedido de LKAB incluye los equipos Scooptram *ST14 Battery* y camión Minetruck *MT42 Battery* [28].
- En la mina Kittilä en Finlandia, durante 2019-2020 se probó el camión minero *MT42 Battery* y el LHD *ST14 Battery*, las mediciones de los contaminantes atmosféricos y las temperaturas del aire tomadas durante la prueba de campo demostraron claramente una mejora significativa de las condiciones de trabajo cuando los BEV funcionaban en lugar de las máquinas diésel, esta observación de campo fue apoyada por la opinión de la mayoría de los trabajadores de la mina [7].
- El cargador eléctrico subterráneo *ST7 Battery*, de Epiroc, opera en la mina Atacocha desde mediados de 2017. La empresa sueca ha estado suministrando anualmente entre 10 a 15 cargadores de este tipo desde el 2021 [29].

No se consiguió información asociada a pruebas en minas de los equipos UMT *MT2010 Battery* de Epiroc y LHD *R1700 XE* de Caterpillar, ni tampoco encargos de estos modelos por parte de mineras.

4.2. Modelo de consumo energético

4.2.1. Fuerzas

Las fuerzas presentes en el desplazamiento de un camión de acarreo subterráneo y de un LHD, se muestran en las figuras 4.5 y 4.6.

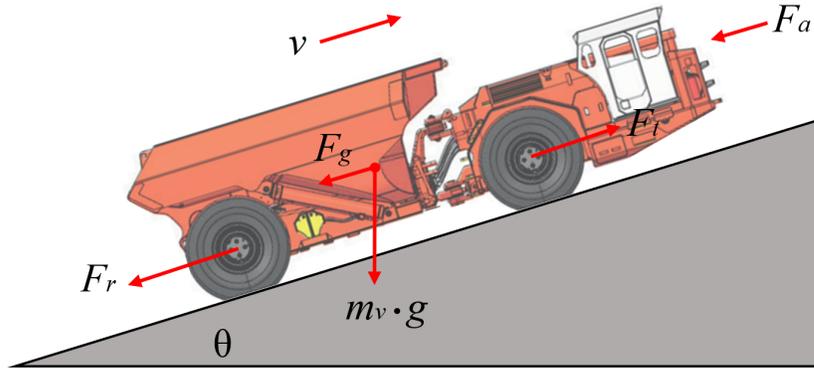


Figura 4.5: Diagrama de cuerpo libre camión de acarreo.

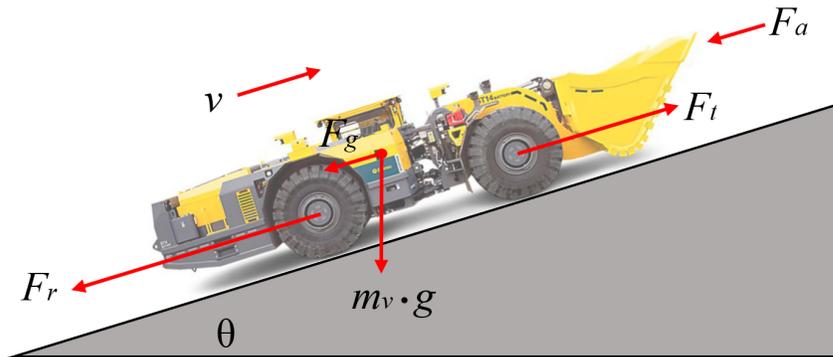


Figura 4.6: Diagrama de cuerpo libre de Load Haul Dump (LHD).

La dinámica de ambos vehículos queda descrita al utilizar la segunda Ley de Newton, de la siguiente forma:

$$F_t(t) - (F_a(t) + F_r(t) + F_g(t)) = m \frac{d}{dt}v(t), \quad (4.1)$$

donde F_t es la fuerza de tracción, F_r es la fuerza debido a la resistencia de rodadura, F_g es la fuerza de resistencia debido a la pendiente y F_a es la fuerza de resistencia aerodinámica. La expresión del lado derecho de la igualdad corresponde a las fuerzas inerciales.

Resistencia a la rodadura

La fuerza de resistencia a la rodadura esta dada por la siguiente expresión:

$$F_r(t) = m_t g \cdot \cos(\theta) \cdot \frac{C_r}{1000} (c_1 v(t) + c_2), \quad (4.2)$$

donde C_r , c_1 y c_2 , son los parámetros de resistencia a la rodadura que varían en función del tipo de superficie de la carretera, el estado de la carretera y el tipo de neumático del vehículo. La masa total y la gravedad hacen que este término tenga un impacto considerable en el consumo de energía.

Resistencia debida a la pendiente

Esta fuerza es la componente longitudinal del peso del vehículo, que depende de la gravedad y el seno del ángulo θ de la pendiente. Esta fuerza esta dada por la siguiente expresión:

$$F_g(t) = m_t g \cdot \sen(\theta), \quad (4.3)$$

se debe destacar que en el escenario a evaluar de minería subterránea el ángulo θ de la pendiente variará entre -15° y 15° grados, por lo cual esta fuerza positiva o negativa será como máximo un 26 % del peso total del vehículo.

Resistencia debida a la inercia

La fuerza inercial estará dada por la siguiente expresión:

$$F_I = m_t^* \cdot \frac{d}{dt} v, \quad (4.4)$$

las partes giratorias del tren motriz y la inercia del vehículo generarán fuerzas ficticias, también conocidas como fuerzas de d'Alembert. En la ecuación 4.4 la fuerza proviene de la masa del vehículo, pero también deben incluirse las masas giratorias, m_r del tren motriz (ruedas y motor), por ello se utiliza $m_t^* = m_t + m_r$. La masas rotativas se calculan con la siguiente expresión:

$$m_r = \frac{1}{r_w^2} \cdot \Theta_w + \frac{\gamma^2}{r_w^2} \cdot \Theta_e, \quad (4.5)$$

donde r_w es el radio de la rueda, γ la relación de transmisión constante y Θ_w la inercia de todas las ruedas y las partes giratorias en el lado de la rueda del mecanismo reductor. De manera similar, Θ_e es la inercia del motor y las partes giratorias del lado del motor. Se debe destacar que es difícil tener los valores exactos de los parámetros de la ecuación 4.5, por ello se asumirá que m_r corresponde a un 5% de m_v , este incremento de la masa es razonable según lo propuesto en [30].

Resistencia Aerodinámica

La fuerza que sufre el vehículo al moverse a través del aire, esta dada por la siguiente expresión:

$$F_a(t) = \frac{1}{2} \cdot \rho_{Air} \cdot A_f \cdot C_D \cdot v^2(t), \quad (4.6)$$

donde ρ es la densidad del aire, A_f el área frontal del vehículo, C_D el coeficiente de resistencia

aerodinámica del vehículo y $v(t)$ es la velocidad del vehículo. Esta fuerza depende notablemente de la velocidad del vehículo ya que esta elevada al cuadrado, para el caso de estudio esta fuerza será de menor relevancia ya que las velocidades no superan los 20 [km/h].

4.2.2. Potencia y energía del vehículo

Para obtener la potencia instantánea en las ruedas del vehículo, de la ecuación 4.1 se despeja F_t y se multiplica a toda la expresión por la velocidad, luego recordando que para las fuerzas $1 [N] = 1 [kg \frac{m}{s^2}]$ y que $1 [Watt] = 1 [kg \frac{m^2}{s^3}]$, se obtiene la expresión para la potencia instantánea en Watts:

$$P_{Ruedas}(t) = (m_t^* a(t) + m_t g \cdot \cos(\theta)) \cdot \frac{C_r}{1000} (c_1 v(t) + c_2) + \frac{1}{2} \rho_{Air} A_f C_D v^2(t) + m_t g \cdot \sin(\theta) \cdot v(t), \quad (4.7)$$

posteriormente se debe determinar $P_{MotorElectrico_{net}}(t)$ la cual corresponde a la potencia en las ruedas definida anteriormente, pero considerando la eficiencia de transmisión ($\eta_{Transmission}$), eficiencia del motor eléctrico ($\eta_{MotElectrico}$) y la eficiencia de la batería ($\eta_{Bateria}$). Además, se agrega a la expresión una potencia auxiliar, asociada a la potencia eléctrica consumida por sistemas auxiliares, por ejemplo, iluminación, ventilación, accionamiento hidráulico, entre otros. La potencia del motor eléctrico neta esta dada por la siguiente expresión:

$$P_{MotorElectrico_{net}}(t) = \frac{P_{Ruedas}(t)}{\eta_{Transmission} \cdot \eta_{MotElectrico} \cdot \eta_{Bateria}} + P_{Aux}, \quad (4.8)$$

determinando la potencia del motor eléctrico, se tiene la ecuación 4.9 para determinar el cambio en el estado de carga de la batería ($\Delta SoC_{(i)}(t)$), y también la ecuación 4.10 para conocer el estado de carga final de la batería ($SoC_{Final}(t)$).

$$\Delta SoC_{(i)}(t) = SoC_{i-1}(t) - \frac{P_{MotorElectrico_{net}}(t)}{3600 \cdot Capacidad_{Bateria}}, \quad (4.9)$$

$$SoC_{Final}(t) = SoC_0 - \sum_{i=1}^N \Delta SoC_{(i)}(t), \quad (4.10)$$

conociendo el estado de carga de la batería se puede calcular la energía consumida por el vehículo en un intervalo de tiempo, con la ecuación 4.11

$$EC[kWh] = \frac{1}{3.600.000} \cdot \int_0^t P_{MotorElectrico_{net}}(t) dt, \quad (4.11)$$

básicamente se integra la potencia del motor eléctrico neta en el intervalo de tiempo y se agrega un constante para pasar de $[W \cdot s]$ a $[kWh]$.

4.2.3. Modelo de batería

En el modelo de consumo energético elaborado, se consideró un modelo de batería ideal, este modelo solo contiene una fuente de voltaje constante y desprecia otros parámetros internos. La tensión del terminal coincide en todo momento con la tensión del circuito abierto. Este modelo mantiene un voltaje constante independientemente de otros factores hasta que se descarga por completo, cuando el voltaje cae a cero. Es importante destacar que en las baterías reales, el voltaje se ve afectado por el SoC, ya que la capacidad disminuye cuando se aumenta la carga.

Para utilizar un modelo de batería mas avanzado es necesario conocer en detalle las variaciones de la resistencia interna de la batería con respecto al SoC, lo cual requeriría de mayor información sobre las baterías de los vehículos por parte del fabricante. La disminución del voltaje de la batería se traduce en una baja de la eficiencia que tiene la batería, de modo que para cubrir un requerimiento de potencia debe gastar mas energía.

Existen otros factores que también afectan el desempeño de una batería, como por ejemplo la temperatura y el estado de salud de la batería (SoH), que depende directamente de los ciclos de carga y descarga que ha tenido la batería, estos factores son considerados en otros modelos que requieren resolver problemas de optimización mas complejos.

4.2.4. Potencia de accionamiento hidráulico y potencia auxiliar

El modelo anterior permite determinar cuanto será el consumo energético de un LHD o un camión de acarreo, al desplazarse de un punto A a un punto B, considerando pendiente de la superficie, velocidad del vehículo y si esta cargado de mineral o no. Sin embargo, esto solo corresponde al gasto de energía por tracción, se debe considerar también que estos vehículos cuentan con un brazo hidráulico cuyo motor eléctrico tendrá una potencia nominal dependiente de la carga útil de mineral que tenga el vehículo.

Este consumo de energía por parte del brazo hidráulico es distinto entre LHD y UMT (camiones de acarreo), pues el LHD al llegar al punto de extracción debe accionar el brazo hidráulico para cargar su balde de mineral y posteriormente al llegar al punto de vaciado (Pique) debe nuevamente accionarlo para verter el mineral, mientras que el UMT solo lo debe accionar para verter el mineral en el punto de vaciado, ya que no necesita accionar el brazo hidráulico para cargar mineral pues este es recibido desde un buzón.

Los camiones de acarreo y LHD en minas subterráneas, pueden estar en cuatro regímenes diferentes: marcha en vacío, marcha cargado, cargando mineral y vertiendo mineral.

Es esperable que al momento de cargar o verter el mineral, la demanda de energía sea

mayor, debido a que se debe accionar el brazo hidráulico para elevar el balde. Para los otros dos regímenes se espera que la utilización del sistema hidráulico sea mucho menor. Al revisar las especificaciones de los camiones de acarreo y LHD, se puede notar que el motor eléctrico auxiliar para el accionamiento hidráulico es de potencias nominales entre 100 [kWh] y 200 [kWh]. La expresión para calcular la energía del sistema hidráulico queda como sigue:

$$E_{aux} = \eta_{aux} \cdot P_{aux} \cdot t, \quad (4.12)$$

donde η_{aux} es el factor de utilización del motor auxiliar, P_{aux} es la potencia del motor auxiliar y t el tiempo. Se asumirá que $\eta_{aux(vacio)} = 0\%$, $\eta_{aux(cargado)} = 0\%$, $\eta_{aux(carga)} = 100\%$ y $\eta_{aux(Descarga)} = 100\%$, es decir, se considera que este brazo hidráulico es solamente accionado durante carga o descarga de mineral y siempre a potencia nominal. El tiempo para cargar o descargar mineral se obtuvo de las especificaciones de los vehículos, estos están entre 10 y 20 segundos.

Por último, al modelo de consumo incluyendo la potencia de accionamiento hidráulico, se le agregará una potencia auxiliar constante asociada al consumo energético de las luces y sistema de ventilación para el conductor, esta potencia será de alrededor de 4000 [W] considerando que las luces tienen un consumo inferior a 700 [W] y el aire acondicionado del vehículo consume 3000 [W] [31]. Esta potencia estará presente mientras el vehículo esté encendido.

4.2.5. Resumen de datos utilizados en el modelo

A continuación se presenta la Tabla 4.3, la cual presenta los datos de entrada requeridos por el modelo de consumo energético.

Es importante resaltar que los datos específicos de los modelos de LHD y UMT, fueron extraídos de las hojas de datos que ofrecen los fabricantes Epiroc, Caterpillar y Sandvik. Las eficiencias utilizadas fueron extraídas de [32], donde se presenta un modelo de consumo de energía de vehículos eléctricos basado en energía.

Por otro lado, en la Tabla 4.3 se resalta en color naranja parámetros que no se utilizaron, el coeficiente de superficie de la carretera y constantes de resistencia a rodadura fueron reemplazadas en la ecuación 4.2 por la resistencia a la rodadura, ya que esta era la resistencia por defecto utilizada en las hojas de datos de los vehículos.

Tabla 4.3: Datos de entrada a modelo de consumo energético.

Parámetro	1	2	3	4	5	6	7	8
	LHD				UMT			
	ST7	ST14	R1700 XE	LH518B	MT2010 Battery	MT42 Battery	TH550B	TH665B
Capacidad de carga útil [ton]	6,8	14	15	18	20	42	50	65
Capacidad Batería [kWh]	165	300	213	353	165	375	354	354
Potencia de motor de tracción [kW]	149	200	217	540	301	400	720	720
Peso del vehículo vacío [kg]	21500	42000	48750	52000	24400	37700	49600	56400
Peso del vehículo cargado [kg]	28300	56000	63750	70000	44400	79700	99600	121400
Área Frontal del vehículo [m^2]	4,18	6,72	6,5	6,26	5,20	7,07	8,23	10,71
Coefficiente de arrastre aerodinámico del vehículo [C_d]	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91
Potencia de accionamiento hidráulico [kW]	76	160	225	200	113	160	200	200
Tiempo de ciclo de movimiento de balde [s]	10,9	14,6	13,2	14,6	14	13	10	10
Potencia consumida por sistemas auxiliares [W]	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
Eficiencia de Transmisión ($\eta_{driveline}$) [%]	92	92	92	92	92	92	92	92
Eficiencia del motor eléctrico ($\eta_{electricmotor}$) [%]	95	95	95	95	95	95	95	95
Eficiencia de la batería ($\eta_{battery}$) [%]	95	96	96	95	95	96	95	95
Resistencia a la rodadura (RR) [%]	3	3	3	3	3	3	3	3
Coefficiente de superficie de la carretera (C_R)	10	10	10	10	10	10	10	10
Primera constante de resistencia a la rodadura (c_1)	0,0328	0,0328	0,0328	0,0328	0,0328	0,0328	0,0328	0,0328
Segunda constante de resistencia a la rodadura (c_2)	4,575	4,575	4,575	4,575	4,575	4,575	4,575	4,575
Aceleración de la gravedad (g) [m/s^2]	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81
Densidad del aire (ρ_{air}) [kg/m^3]	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22
Frenado Regenerativo	No	No	No	Si	No	Si	Si	Si

4.3. Caracterización de la operación en la mina

Para el caso base de operación en la mina se considera que en el nivel de producción (NP) se tiene una malla de extracción tipo Teniente de 16×20 [m], es decir, calles separadas a 32 [m] (distancia perpendicular entre calles) y zanjas distanciadas a 20 [m] (distancia paralela al eje de la calle). Los 40 puntos de extracción están dispuestos en una superficie de 11.200 [m^3] (100×116 [m]), se tiene 1 punto de vaciado (Pique) en el nodo amarillo N0 y se considera que el lugar para cargar las baterías de los LHD está distanciado a 50 [m] del Pique, ver Figura 4.7 .

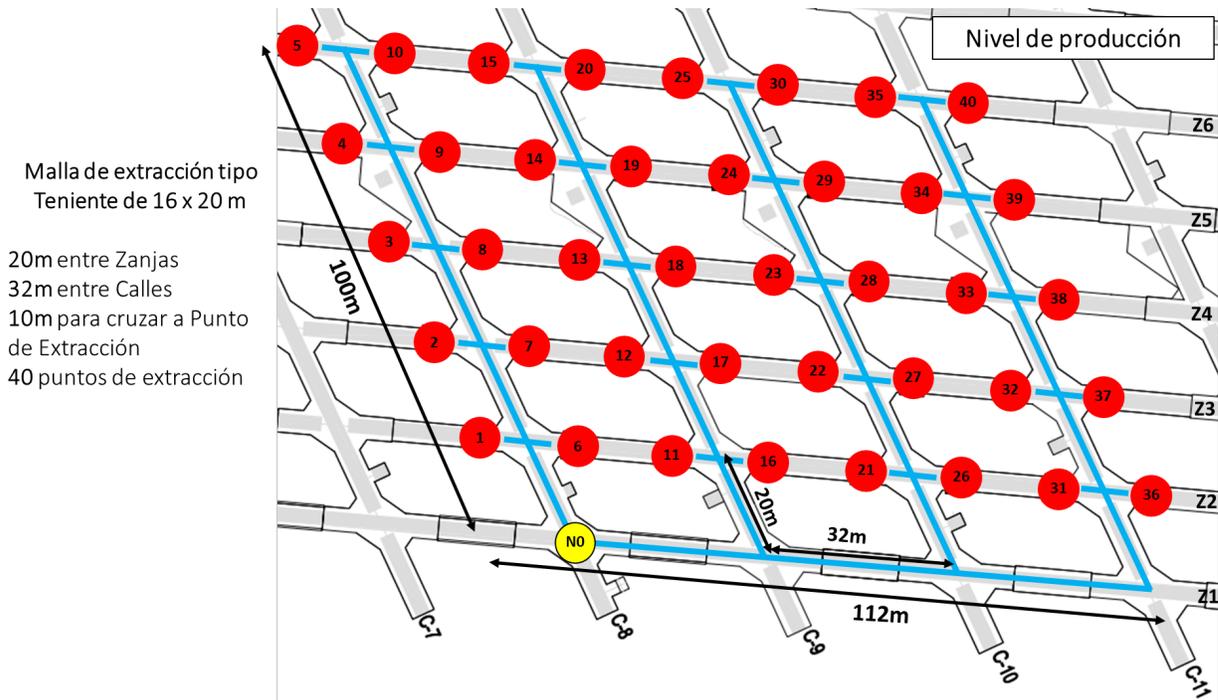


Figura 4.7: Grafo de Caso base de operación del nivel de producción en la mina con 40 puntos de extracción.

La actividad desarrollada en este nivel corresponde a la extracción del mineral desde los 40 puntos de extracción ubicados en el NP, mediante equipos LHD. Estos equipos trasladan y descargan el mineral en un punto de vaciado, para traspasar mediante un pique, a un buzón electrohidráulico ubicado en el Nivel de transporte intermedio (NTI), donde esperan camiones de acarreo subterráneo (UMT). El punto de vaciado del NP cuenta con una parrilla de apertura y un martillo telecomandado. Un esquema de esta operación puede observarse en la Figura 4.8 .

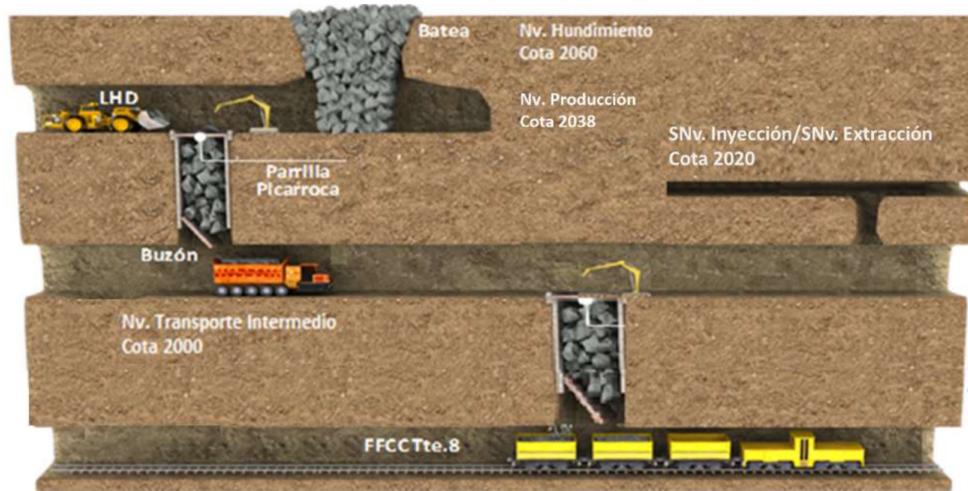


Figura 4.8: Esquema conceptual de operaciones entre NP y NTI [33].

La sección excavada de las calles es de $5,2 \times 4,6$ [m] y la de Galerías Zanjas es de $4,7 \times 4,6$ [m], esto permite que se puedan utilizar equipos LHD con tamaños de balde máximo $10 \text{ [m}^3\text{]}$, esto se adecúa a los equipos LHD a similar, ya que tienen tamaños de balde inferiores a $8,6 \text{ [m}^3\text{]}$.

Para la operación de los UMT, el grafo base es distinto ya que estos vehículos operan en el NTI, el grafo base para la operación de UMT solo tiene 3 nodos: el primero corresponde al punto de carga de baterías, el segundo es el punto de vaciado y el tercero, corresponde al buzón donde se recibe el mineral que dejan los LHD en el pique. La distancia entre el punto de vaciado y el buzón es de 200 [m], mientras que la distancia entre punto de vaciado y punto de carga de baterías es 50 [m].

Se realizaron algunos supuestos, mencionados a continuación:

- En cada tramo recorrido por los vehículos, se asume que se mantiene una velocidad constante de $2,5$ [m/s] equivalente a 9 [km/h] de inicio a fin, se considera que para alcanzar esta velocidad constante el vehículo tiene una aceleración dependiente de si esta cargado de mineral o no, esta aceleración será de $0,5$ [m/s²] y de 1 [m/s²] respectivamente.
- Para las simulaciones realizadas se considera que la pendiente del recorrido hacia los puntos de extracción es de 0° , 5° y -5° . Normalmente en el nivel de producción de una mina subterránea el desnivel es mínimo, pero es relevante analizar los casos con pendientes positivas y negativas, ya que influyen notablemente en el consumo energético de la operación. Adicional a esto también se realizó una simulación donde la pendiente de todos los tramos recorridos será de 5° , es decir, la pendiente del tramo de ida y el de vuelta es 5° . El objetivo de esta última simulación es observar el desempeño de los vehículos bajo una peor condición asumiendo que existen grandes irregularidades en el terreno.
- Cada simulación realizada considera la operación aislada de un vehículo, esto se realizó para varios modelos de vehículos, bajo distintos tipos de carga de batería y distintas pendientes en el recorrido.

- Se definió un estado de carga mínimo y máximo de la batería, $SOC_{min} = 20\%$ y $SOC_{max} = 90\%$ respectivamente, esto con el objetivo de preservar la vida útil de la batería. Además se asumió un modelo de batería ideal, en el cual se mantiene un voltaje constante independientemente de otros factores hasta que se descarga por completo.
- Los equipos LHD inician la operación con su batería cargada completamente desde el nodo donde se carga la batería. Posteriormente se dirigen al punto de extracción 1 (PE1), llenan completamente su balde, es decir, recogen tantas toneladas de mineral como permita su capacidad de carga útil. Luego se dirigen hacia el punto de vaciado ubicado en N0 y descargan el mineral. Este proceso se repetirá con el siguiente punto de extracción.
- En caso de que el vehículo no posea suficiente energía en su batería para ir y volver a un punto de extracción, este cargará su batería hasta SOCmax y continuará operando en el siguiente punto de extracción.
- En las simulaciones de 24 [h] se definieron 2 turnos de trabajo de 10 horas. El Turno A de 7:00 a 17:00 [hrs] con 1 [h] de colación de 11:00 a 12:00 [hrs]. Por otro lado, el Turno B de 19:00 a 5:00 [hrs] con 1 [h] de colación de 23:00 a 24:00 [hrs].
- Se asume que estos horarios de colación y de cambio de turno son inamovibles. Durante estos tiempos de descanso se dejaron cargando los vehículos, sin importar el estado de carga de la batería.
- Todas las simulaciones realizadas consideran la operación de 1 solo vehículo.
- Las simulaciones de los UMT no están coordinadas con la operación de los LHD, pues se considera que cada vez que el vehículo llega a cargar mineral en el buzón, siempre habrá mineral disponible para completar las toneladas de carga útil que tiene el vehículo.

Capítulo 5

Casos de estudio y resultados

5.1. Resultados Simulaciones LHD

5.1.1. Simulación Operación LHD a 2 Puntos de Extracción

El objetivo de mostrar los resultados de esta simulación del LHD ST7 Battery hacia los PE1 y PE2, es básicamente para mostrar en pequeña escala la gráfica de potencia instantánea en cada tramo recorrido, ver Figura 5.1 .

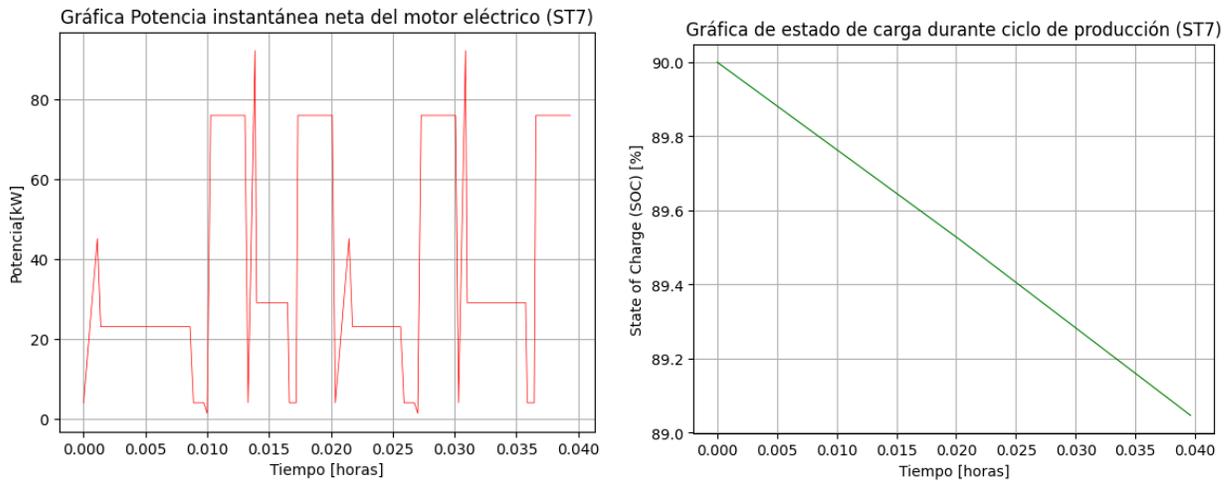


Figura 5.1: Simulación Operación LHD ST7 Battery a 2 Puntos de Extracción.

La Figura 5.1, muestra que en recolectar el mineral de los dos puntos de extracción se gasta menos de un 1% de la batería, la potencia consumida durante esta operación estuvo entre 23 y 28 [kW], y esta operación duro aproximadamente 2 minutos y 20 segundos. La forma de la gráfica de la potencia instantánea se debe a que: inicialmente se tiene un consumo de potencia constante de 23 [kW] durante el recorrido desde el punto de carga de batería hasta PE1, luego esta potencia aumenta debido a la potencia de accionamiento hidráulico para cargar mineral que es mayor a la potencia de tracción descargado, después se observa que la potencia disminuye a 28 [kW] asociado a la potencia de tracción requerida para ir de PE1 al Pique con las toneladas de material recolectado, finalmente se ve que la potencia aumenta a 28 [kW] debido a la potencia de accionamiento hidráulico para descargar, este proceso demoró 75 [seg].

En la gráfica de potencia de la Figura 5.1, se puede notar que al inicio de cada desplazamiento del vehículo existe un peak de potencia, este se debe a la fuerza inercial que se debe vencer para desplazar el vehículo a la velocidad constante requerida. También se debe notar que la potencia consumida durante el desplazamiento depende directamente de la pendiente del tramo recorrido y de la carga de mineral del vehículo, al aumentar 5 grados la pendiente la potencia de desplazamiento se hace incluso mayor a la del accionamiento hidráulico.

La siguiente parte de la gráfica es una repetición del mismo proceso y solo cambia la duración debido a la lejanía de los puntos de extracción. Esto se puede observar en los resultados obtenidos al recorrer los 40 puntos de extracción, ver Figura 5.2 .

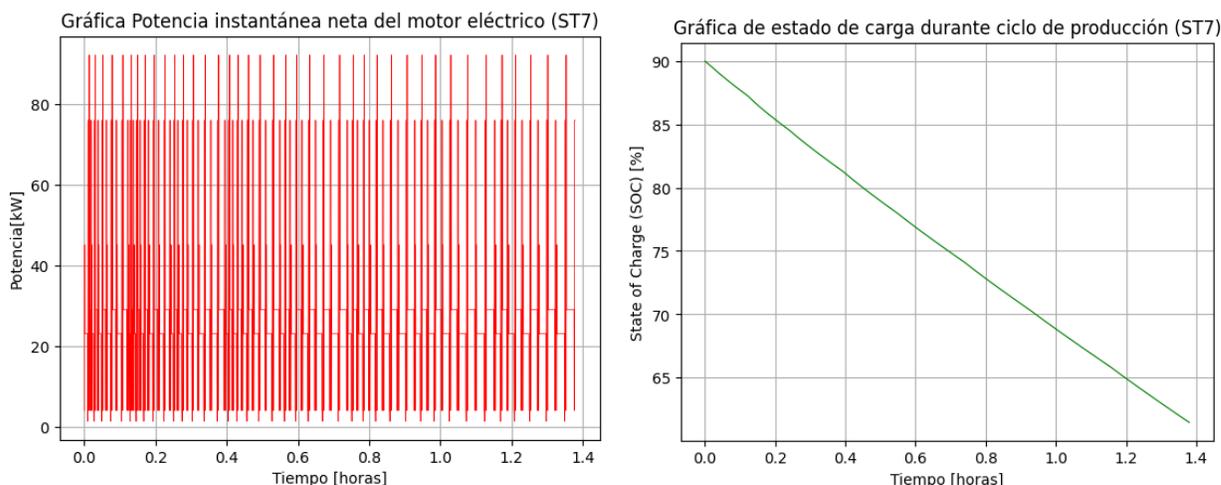


Figura 5.2: Simulación Operación LHD ST7 Battery a 40 Puntos de Extracción.

En la Figura 5.2, se puede observar perfectamente la gráfica de potencia al recorrer 40 nodos y el hecho de que el vehículo ST7 Battery se gasta casi un 30 % de su batería en realizar esta tarea.

En las siguientes secciones se mostrarán los resultados obtenidos en las simulaciones de operación de cada uno de los LHD evaluados durante 24 [h] y bajo distintos tipos de carga de batería. En la Tabla 5.1, se muestran los tiempos de carga utilizados en cada simulación.

Tabla 5.1: Tiempos de carga utilizados para cada LHD en simulaciones 1 y 2.

Modelo	Capacidad Batería [kWh]	Simulación 1 (24 [h])		Simulación 2 (24 [h])	
		Tiempo Carga Batería a bordo(lenta) [min]	Tiempo Carga Batería rápida particular [min]	Tiempo Carga Batería a bordo(lenta) [min]	Tiempo Carga Batería rápida particular [min]
ST7 Battery	165	152,3	12,0	152,3	12,0
ST14 Battery	300	122,2	12,0	122,2	12,0
R1700 XE	213	25,6	15,2	25,6	15,2
LH518B	353	58,8	5,0	58,8	5,0

Tiempo de carga batería a bordo [min]: corresponde al tiempo en minutos que tarda en

cargar la batería del vehículo de 0 a 100 %, este tiempo depende directamente de la capacidad de la batería y de la potencia de carga dada por el fabricante. En este modo de carga no se saca la batería del vehículo, sino que se estaciona el vehículo y la batería se carga a bordo.

Tiempo de carga batería rápida particular [min]: corresponde al tiempo en minutos que tarda en cambiar la batería del vehículo por otra cargada completamente, este tiempo depende del modelo del vehículo, pues los de Epiroc demoran 12 minutos en hacer el cambio requiriendo una estructura de grúa para trasladar la batería, los de Sandvik realizan self swapping demorando solo 5 minutos sin necesitar grúas ni operadores extra, y por último, el modelo de caterpillar que no ofrece cambiar la batería pero si un modo de carga mas rápido que consiste en utilizar 2 cargadores en paralelo. Se asume que siempre hay baterías cargadas disponibles.

5.1.2. Simulación 1: Operación LHD en Nivel de Producción

A continuación se presentan los resultados de la simulación de 24 horas de operación de cada modelo de LHD, bajo el modo de carga de batería a bordo y considerando que la pendiente de todos los tramos recorridos es de 0°.

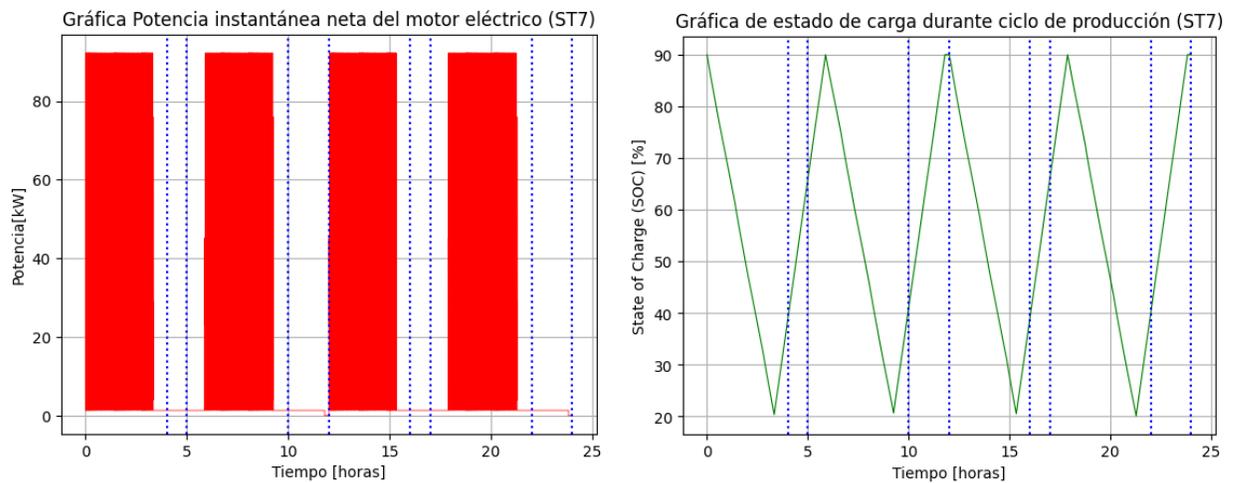


Figura 5.3: Resultados Simulación 1 de potencia instantánea y SOC durante 24 [h] de operación para el LHD ST7 Battery. Punteo azul indica los intervalos de tiempo de descanso.

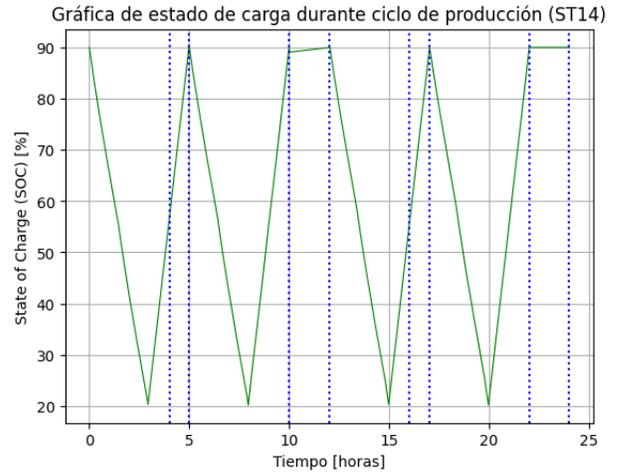
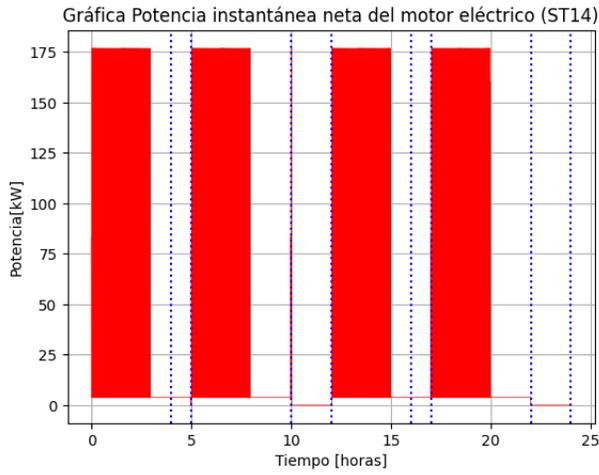


Figura 5.4: Resultados Simulación 1 de potencia instantánea y SOC durante 24 [h] de operación para el LHD ST14 Battery. Punteo azul indica los intervalos de tiempo de descanso.

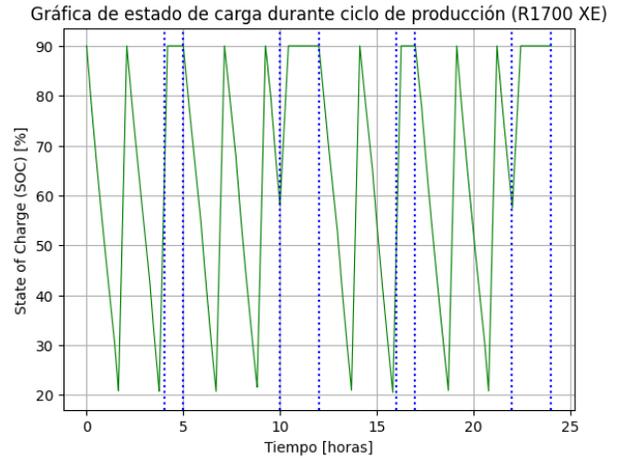
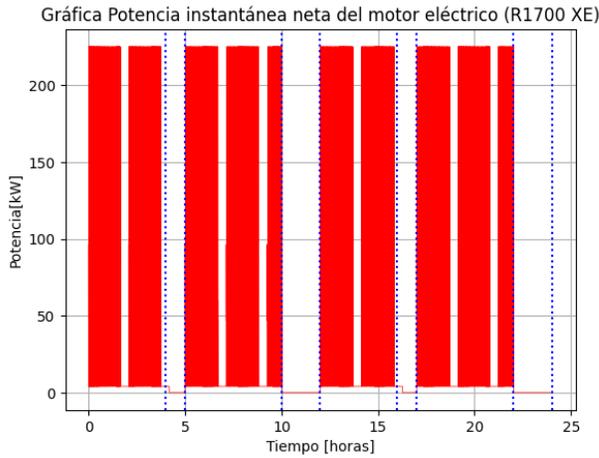


Figura 5.5: Resultados Simulación 1 de potencia instantánea y SOC durante 24 [h] de operación para el LHD R1700 XE. Punteo azul indica los intervalos de tiempo de descanso.

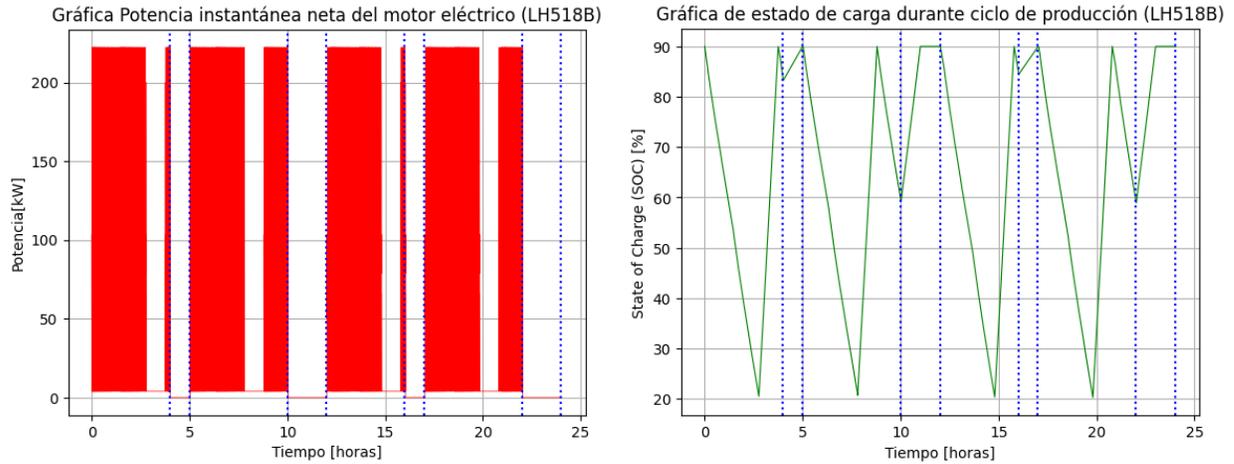


Figura 5.6: Resultados Simulación 1 de potencia instantánea y SOC durante 24 [h] de operación para el LHD LH518B. Punteo azul indica los intervalos de tiempo de descanso.

Los resultados de las 4 simulaciones realizadas se muestran en la Tabla 5.2, además, se agregan los resultados obtenidos para los casos donde la pendiente de los tramos hacia los puntos de extracción es de 5° y -5° .

Tabla 5.2: Resultados Simulación 1 de LHD operando en grafo caso base durante 24 [h], bajo condiciones de pendiente hacia puntos de extracción de 0° , 5° y -5° .

Resultados Simulación 1 de LHD durante 24h y 40 puntos de extracción (pendiente 0°)											
Modelo	Carga útil [ton]	Capacidad Batería [kWh]	Consumo energético [kWh]	Tiempo total [seg]	Tiempo total [h]	SOC Final [%]	Toneladas [ton]	Cargas Batería	Consumo por Ton [kWh/ton]	Productividad [ton/h]	Cant PE Visitados
ST7	6,8	165	460	86401	24,00	90	2665,6	4	0,172	111,07	392
ST14	14	300	841	86401	24,00	90	4550	5	0,185	189,58	325
R1700 XE	15	213	1319	86511	24,03	90	6360	10	0,207	264,66	424
LH518B	18	353	1247	86530	24,04	90	6984	8	0,179	290,56	388
Resultados Simulación 1 de LHD durante 24h y 40 puntos de extracción (pendiente 5°)											
Modelo	Carga útil [ton]	Capacidad Batería [kWh]	Consumo energético [kWh]	Tiempo total [seg]	Tiempo total [h]	SOC Final [%]	Toneladas [ton]	Cargas Batería	Consumo por Ton [kWh/ton]	Productividad [ton/h]	Cant PE Visitados
ST7	6,8	165	366	86425	24,01	90	2570	6	0,142	107,05	378
ST14	14	300	834	86401	24,00	90	5418	4	0,154	225,75	387
R1700 XE	15	213	1156	86443	24,01	90	6480	10	0,178	269,87	432
LH518B	18	353	1076	86484	24,02	90	7272	6	0,148	302,71	404
Resultados Simulación 1 de LHD durante 24h y 40 puntos de extracción (pendiente -5°)											
Modelo	Carga útil [ton]	Capacidad Batería [kWh]	Consumo energético [kWh]	Tiempo total [seg]	Tiempo total [h]	SOC Final [%]	Toneladas [ton]	Cargas Batería	Consumo por Ton [kWh/ton]	Productividad [ton/h]	Cant PE Visitados
ST7	6,8	165	461	86401	24,00	90	2216,8	4	0,208	92,37	326
ST14	14	300	921	86561	24,04	90	4214	6	0,219	175,26	301
R1700 XE	15	213	1485	86480	24,02	90	6135	12	0,242	255,39	409
LH518B	18	353	1487	86457	24,02	90	6966	8	0,213	290,06	387

Al analizar los resultados de la Tabla 5.2, se puede notar que el caso donde la pendiente hacia los puntos de extracción es 5° es el de mayor productividad y de menor consumo energético por tonelada transportada, mientras que el caso donde la pendiente es -5° se tiene la menor productividad y el mayor consumo energético. Estas diferencias se deben a que

cuando la pendiente es de 5° los vehículos aumentan su gasto energético en el tramo de ida debido a la pendiente, pero en la vuelta hacia el pique la pendiente es negativa y el vehículo tiene un gasto energético casi nulo ya que solo debe acelerar al inicio, mientras que cuando la pendiente es -5° la ida hacia el punto de extracción tiene un bajo consumo energético pero la vuelta hacia el pique tiene un consumo energético notablemente mayor debido a la pendiente positiva y al aumento de la masa del vehículo debido al mineral que transporta. Es decir, el caso donde la pendiente es -5° es el mas desfavorable debido a que los vehículos deben subir tramos con pendiente estando cargados de mineral.

Se realizó una simulación extra de peor condición considerando que los vehículos en todos los tramos suben una pendiente de 5° , es decir, en el tramo de ida hacia los puntos de extracción la pendiente es 5° y en el tramo de vuelta hacia el pique la pendiente también es 5° , los resultados de esta simulación se muestran en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3: Resultados Simulación 1 de LHD operando en grafo caso base durante 24 [h] (peor condicion).

Resultados Simulación 1 de LHD durante 24h y 40 puntos de extracción (peor condición)											
Modelo	Carga útil [ton]	Capacidad Batería [kWh]	Consumo energético [kWh]	Tiempo total [seg]	Tiempo total [h]	SOC Final [%]	Toneladas [ton]	Cargas Batería	Consumo por Ton [kWh/ton]	Productividad [ton/h]	Cant PE Visitados
ST7	6,8	165	648	86540	24,04	90	1557	8	0,416	64,78	229
ST14	14	300	1451	86401	24,00	90	3528	8	0,412	147,00	252
R1700 XE	15	213	2294	86470	24,02	90	5040	18	0,455	209,83	336
LH518B	18	353	2200	86487	24,02	90	5454	10	0,403	227,02	303

Al comparar los resultados mostrados en la Tabla 5.3 con los de pendiente 0° en la Tabla 5.2, se puede notar que en la peor condición el consumo energético es casi el doble, la productividad se reduce en promedio un 26,7% y el consumo energético por tonelada transportada aumenta el doble. Estos resultados muestran la importancia de que existan condiciones adecuadas en los tramos donde los LHD transitan, ya que pequeños aumentos en las pendientes aumentan fuertemente el consumo energético de los vehículos, descargándose mas rápido las baterías y aumentando los ciclos de carga de las baterías.

5.1.3. Simulación 2: Operación LHD en Nivel de Producción

A continuación se presentan los resultados de la simulación de 24 horas de operación de cada modelo de LHD, bajo el modo de cambio de baterías o carga ultra rápida en el caso del R1700 XE y considerando que la pendiente de todos los tramos recorridos es de 0° .

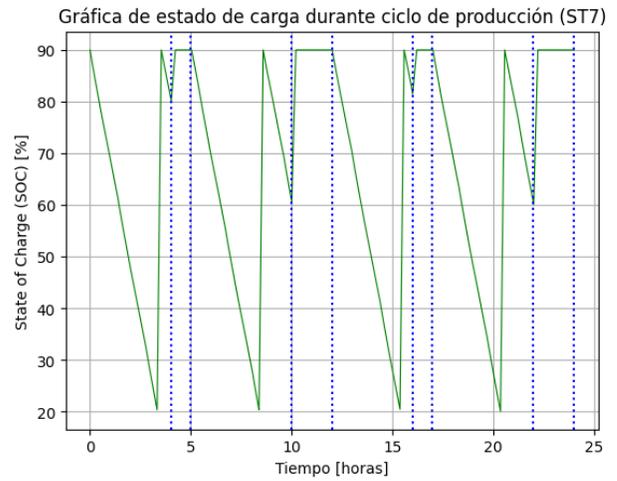
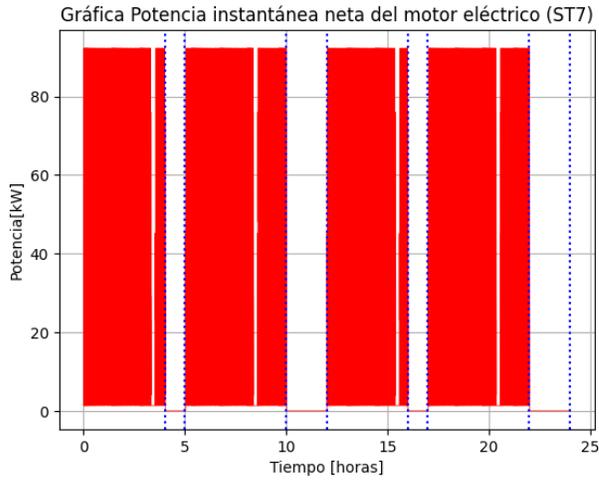


Figura 5.7: Resultados Simulación 2 de potencia instantánea y SOC durante 24 [h] de operación para el LHD ST7 Battery. Punteo azul indica los intervalos de tiempo de descanso.

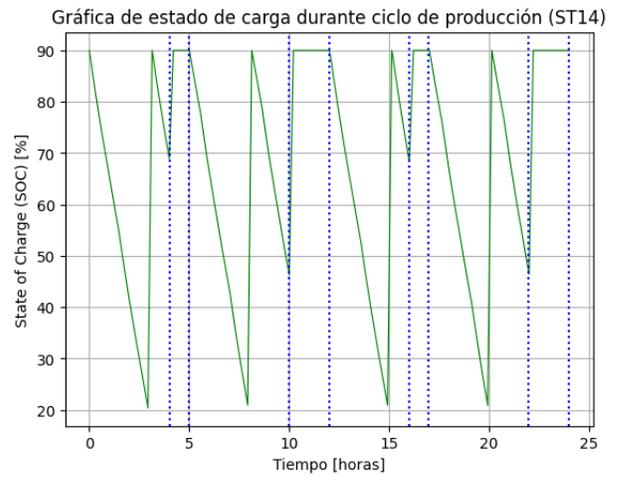
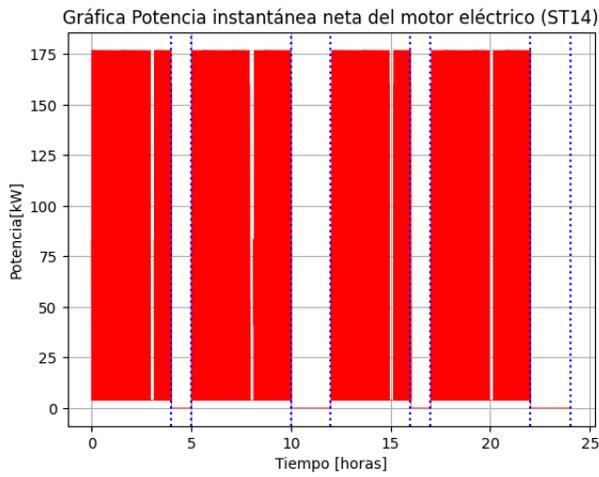


Figura 5.8: Resultados Simulación 2 de potencia instantánea y SOC durante 24 [h] de operación para el LHD ST14 Battery. Punteo azul indica los intervalos de tiempo de descanso.

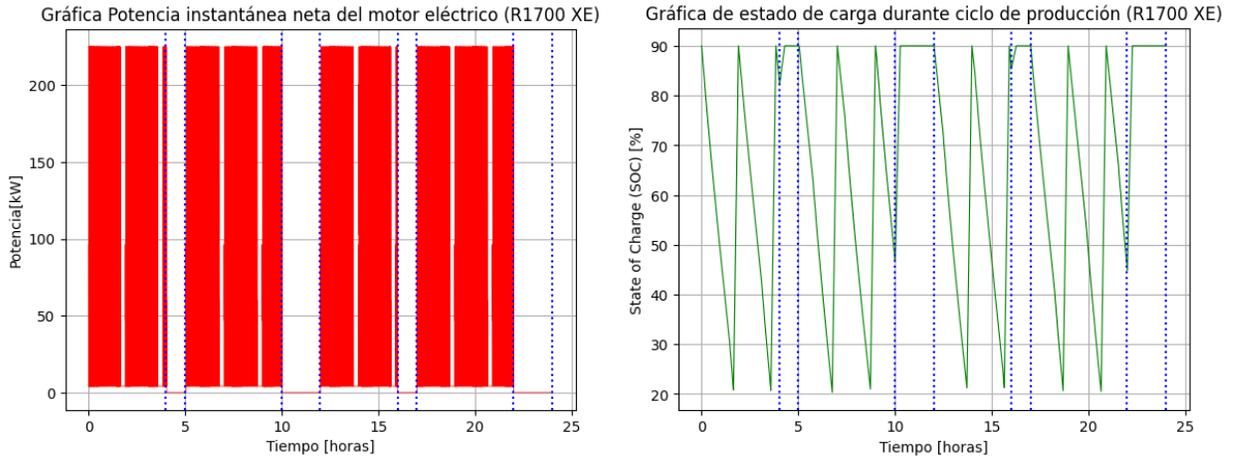


Figura 5.9: Resultados Simulación 2 de potencia instantánea y SOC durante 24 [h] de operación para el LHD R1700 XE. Punteo azul indica los intervalos de tiempo de descanso.

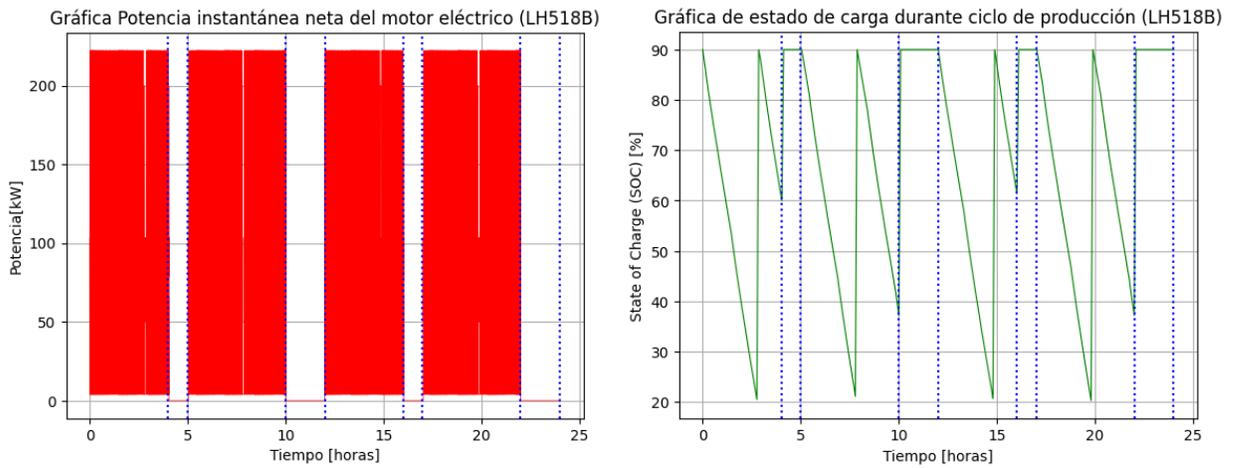


Figura 5.10: Resultados Simulación 2 de potencia instantánea y SOC durante 24 [h] de operación para el LHD LH518B. Punteo azul indica los intervalos de tiempo de descanso.

Los resultados de las 4 simulaciones realizadas se muestran en la Tabla 5.4, además, se agregan los resultados obtenidos para los casos donde la pendiente de los tramos hacia los puntos de extracción es de 5° y -5° .

Tabla 5.4: Resultados Simulación 2 de LHD operando en grafo caso base durante 24 [h], bajo condiciones de pendiente hacia puntos de extracción de 0° , 5° y -5° .

Resultados Simulación 2 de LHD durante 24h y 40 puntos de extracción (pendiente 0°)											
Modelo	Carga útil [ton]	Capacidad Batería [kWh]	Consumo energético [kWh]	Tiempo total [seg]	Tiempo total [h]	SOC Final [%]	Toneladas [ton]	Cargas Batería	Consumo por Ton [kWh/ton]	Productividad [ton/h]	Cant PE Visitados
ST7	6,8	165	589	86508	24,03	90	3420	8	0,172	142,32	503
ST14	14	300	1223	86508	24,03	90	6608	8	0,185	274,99	472
R1700 XE	15	213	1397	86470	24,02	90	6735	12	0,207	280,40	449
LH518B	18	353	1562	86455	24,02	90	8748	8	0,179	364,27	486
Resultados Simulación 2 de LHD durante 24h y 40 puntos de extracción (pendiente 5°)											
Modelo	Carga útil [ton]	Capacidad Batería [kWh]	Consumo energético [kWh]	Tiempo total [seg]	Tiempo total [h]	SOC Final [%]	Toneladas [ton]	Cargas Batería	Consumo por Ton [kWh/ton]	Productividad [ton/h]	Cant PE Visitados
ST7	6,8	165	497	86566	24,05	90	3488,4	6	0,142	145,07	513
ST14	14	300	1023	86562	24,05	90	6594	8	0,155	274,24	471
R1700 XE	15	213	1236	86542	24,04	90	6945	10	0,178	288,90	463
LH518B	18	353	1296	86529	24,04	90	8748	8	0,148	363,96	486
Resultados Simulación 2 de LHD durante 24h y 40 puntos de extracción (pendiente -5°)											
Modelo	Carga útil [ton]	Capacidad Batería [kWh]	Consumo energético [kWh]	Tiempo total [seg]	Tiempo total [h]	SOC Final [%]	Toneladas [ton]	Cargas Batería	Consumo por Ton [kWh/ton]	Productividad [ton/h]	Cant PE Visitados
ST7	6,8	165	708	86433	24,01	90	3406,8	8	0,208	141,90	501
ST14	14	300	1453	86508	24,03	90	6608	8	0,220	274,99	472
R1700 XE	15	213	1591	86401	24,00	90	6555	12	0,243	273,12	437
LH518B	18	353	1848	86499	24,03	90	8658	10	0,213	360,34	481

Al analizar los resultados de la Tabla 5.4, se puede notar al igual que en la simulación 1 que el caso donde la pendiente hacia los puntos de extracción es 5° es el de mayor productividad y de menor consumo energético por tonelada transportada, mientras que el caso donde la pendiente es -5° se tiene la menor productividad y el mayor consumo energético.

Se realizó una simulación extra de peor condición considerando que los vehículos en todos los tramos suben una pendiente de 5° , es decir, en el tramo de ida hacia los puntos de extracción la pendiente es 5° y en el tramo de vuelta hacia el pique la pendiente también es 5° , los resultados de esta simulación se muestran en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5: Resultados Simulación 2 de LHD operando en grafo caso base durante 24 [h] (peor condición).

Resultados Simulación 2 de LHD durante 24h y 40 puntos de extracción (peor condición)											
Modelo	Carga útil [ton]	Capacidad Batería [kWh]	Consumo energético [kWh]	Tiempo total [seg]	Tiempo total [h]	SOC Final [%]	Toneladas [ton]	Cargas Batería	Consumo por Ton [kWh/ton]	Productividad [ton/h]	Cant PE Visitados
ST7	6,8	165	1316	86452	24,04	90	3155,2	14	0,403	140,04	464
ST14	14	300	2546	86445	24,03	90	6160	14	0,408	271,46	440
R1700 XE	15	213	2606	86401	24,02	90	5685	18	0,449	249,12	379
LH518B	18	353	3387	86451	24,00	90	8838	15	0,398	368,25	464

Al comparar los resultados mostrados en la Tabla 5.5 con los de pendiente 0° en la Tabla 5.4, se puede notar que en la peor condición el consumo energético es mas del el doble, la productividad se reduce en promedio un 8,67% y el consumo energético por tonelada transportada aumenta el doble. Al comparar con los resultados de la simulación 1 la diferencia principal es que la reducción de la productividad en el peor caso es menor, esto se debe a que si bien en este caso la batería se descarga mas rápido, el modo de carga rápida o el de

cambio de batería aumenta las horas efectivas de trabajo, y por tanto, la productividad.

Luego de tener los resultados de las dos simulaciones con distintos tipos de carga de batería, se comparan los resultados de las tablas 5.2 y 5.4, se puede notar que en cuanto a consumo energético por tonelada transportada todos los vehículos tienen un consumo promedio de 200 [Wh/ton], las diferencias entre estos es mínima. Al observar la productividad se ve una clara diferencia entre cada LHD debido a las diferencias de capacidad de carga útil que poseen, también se hace relevante la capacidad de la batería del LHD en la productividad pues en la simulación 2 se pudo observar que el LHD R1700 XE aunque tenía una capacidad de carga útil muy similar a la del ST14 Battery, la productividad fue mucho menor debido a que su capacidad de batería es de 213 [kWh] mientras que el ST14 Battery tiene 300 [kWh].

Los resultados de la simulación 2 son notablemente superiores en cuanto a productividad, esto se debe a los tiempos de cambio de batería utilizados que son mucho menores a cargar la batería a bordo. Se debe notar que se considera que siempre hay disponibilidad de baterías cargadas al momento de requerir cambiar la batería, considerar que esta disponibilidad tiene la limitante de ser costosa debido a que se requiere tener baterías extras que tienen un alto costo.

En la simulación 1 se podrían mejorar los resultados obtenidos si la hora de colación deja de ser inamovible y se toma justo cuando se requiera cargar la batería, ya que la simulación actual interrumpe la operación para cumplir con la hora de colación.

5.2. Resultados Simulaciones UMT

5.2.1. Simulación Operación UMT con solo dos idas al buzón de carga

El objetivo de mostrar los resultados de esta simulación del UMT MT2010 Battery al ir dos veces del buzón de carga al Pique, es básicamente para mostrar en pequeña escala la gráfica de potencia instantánea en cada tramo recorrido, ver Figura 5.11 .

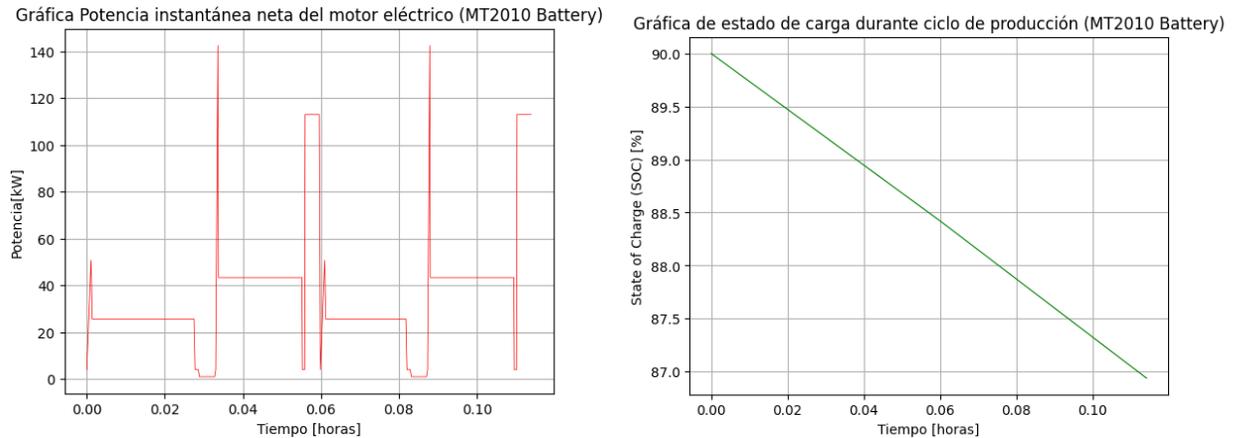


Figura 5.11: Simulación Operación UMT MT2010 Battery con solo dos idas al buzón de carga.

La Figura 5.11, muestra que en esta operación se gasta menos de un 4% de la batería, la potencia consumida durante esta operación estuvo entre 28 y 43 [kW], esta operación duro aproximadamente 7 minutos. La forma de la gráfica de la potencia instantánea se debe a que: inicialmente se tiene un consumo de potencia constante durante el recorrido desde el punto de carga de batería hasta el buzón de carga, luego se observa un aumento de la potencia en 43 [kW] asociado a la potencia de tracción requerida para ir del buzón de carga al Pique con las toneladas de mineral recolectado, finalmente se ve que la potencia aumenta a 112 [kW] debido a la potencia de accionamiento hidráulico para descargar, este proceso demora 210 [seg]. Se debe destacar que al llegar al buzón de carga el vehículo debería estar detenido unos 20 segundos mientras es cargado consumiendo una potencia mínima de 4000 [W]. Se puede notar que al inicio de cada desplazamiento existe un peak de potencia, este se debe a la fuerza inercial que se debe vencer para desplazar el vehículo a la velocidad constante requerida.

También se debe notar que la potencia consumida durante el desplazamiento depende directamente de la pendiente del tramo recorrido y de la carga de mineral del vehículo, al aumentar 5 grados la pendiente la potencia de desplazamiento se hace incluso mayor a la del accionamiento hidráulico.

La siguiente parte de la gráfica es una repetición del mismo proceso y solo cambia la duración debido a la lejanía de los puntos de extracción. Esto se puede observar en los resultados obtenidos al ir a recoger mineral en el buzón de carga 40 veces, ver Figura 5.12 .

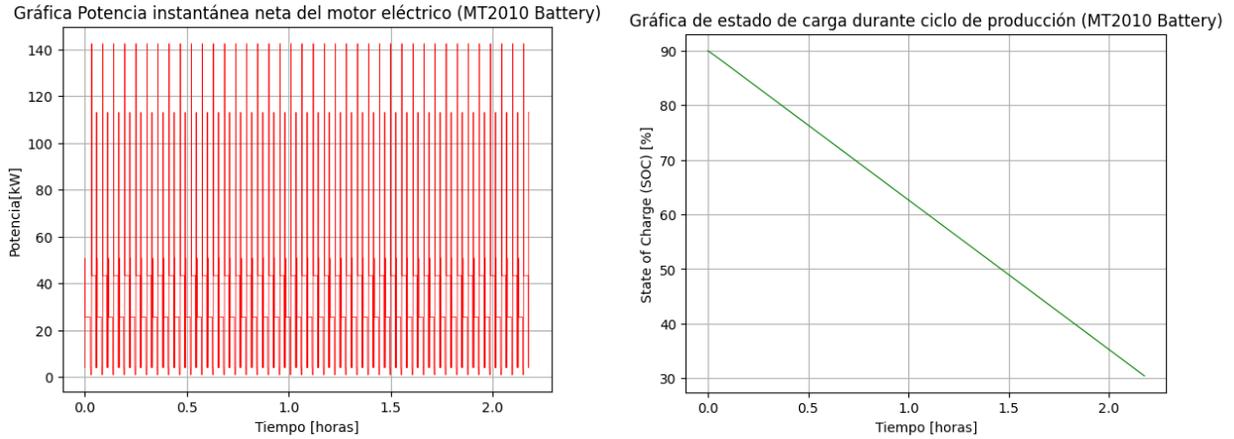


Figura 5.12: Simulación Operación UMT MT2010 Battery con 40 idas al buzón de carga.

En la Figura 5.12, se puede observar que el vehículo logra ir a los 40 puntos de extracción en menos de 2,5 [h] y que su estado de carga al final es de 30 %. La autonomía de este vehículo bajo estas condiciones de trabajo (pendiente 0°) es cercana a 2,5 horas, por lo cual, es posible realizar el trabajo este trabajo sin requerir cargar o cambiar la batería.

En las siguientes secciones se mostrarán los resultados obtenidos en las simulaciones de operación de cada uno de los UMT evaluados durante 24 [h] y bajo distintos tipos de carga de batería. En la Tabla 5.6, se muestran los tiempos de carga utilizados en cada simulación.

Tabla 5.6: Tiempos de carga utilizados para cada UMT en simulaciones 1 y 2.

Modelo	Capacidad Batería [kWh]	Simulación 1 (24 [h])		Simulación 2 (24 [h])	
		Tiempo Carga Batería a bordo(lenta) [min]	Tiempo Carga Batería rápida particular [min]	Tiempo Carga Batería a bordo(lenta) [min]	Tiempo Carga Batería rápida particular [min]
MT2010 Battery	165	152,3	12,0	152,3	12,0
MT42 Battery	375	200,0	12,0	200,0	12,0
TH550B	354	59,0	5,0	59,0	5,0
TH665B	354	59,0	5,0	59,0	5,0

Tiempo de carga batería a bordo [min]: corresponde al tiempo en minutos que tarda en cargar la batería del vehículo de 0 a 100 %, este tiempo depende directamente de la capacidad de la batería y de la potencia de carga dada por el fabricante. En este modo de carga no se saca la batería del vehículo, sino que se estaciona el vehículo y la batería se carga a bordo.

Tiempo de carga batería rápida particular [min]: corresponde al tiempo en minutos que tarda en cambiar la batería del vehículo por otra cargada completamente, este tiempo depende del modelo del vehículo, pues los de Epiroc demoran 12 minutos en hacer el cambio requiriendo una estructura de grúa para trasladar la batería, los de Sandvik realizan self swapping demorando solo 5 minutos sin necesitar grúas ni operadores extra, y por último, el modelo de caterpillar que no ofrece cambiar la batería pero si un modo de carga mas rápido que consiste en utilizar 2 cargadores en paralelo. Se asume que siempre hay baterías cargadas disponibles.

5.2.2. Simulación 1: Operación UMT en Nivel de transporte intermedio

A continuación se presentan los resultados de la simulación 1 de 24 horas de operación de cada modelo de UMT, bajo el modo carga de batería a bordo y considerando que la pendiente de todos los tramos recorridos es de 0° .

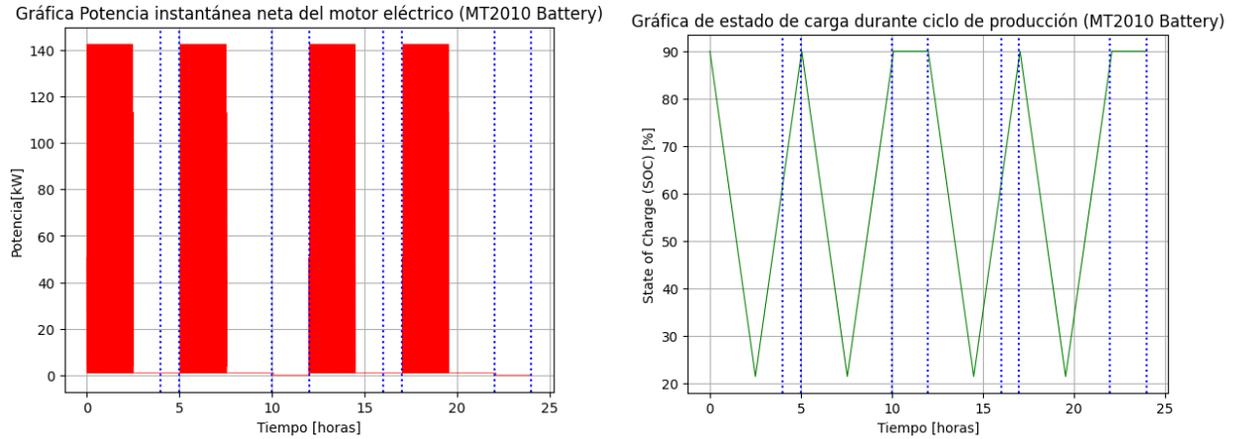


Figura 5.13: Resultados Simulación 1 de potencia instantánea y SOC durante 24 [h] de operación para el UMT MT2010 Battery. Punteo azul indica los intervalos de tiempo de descanso.

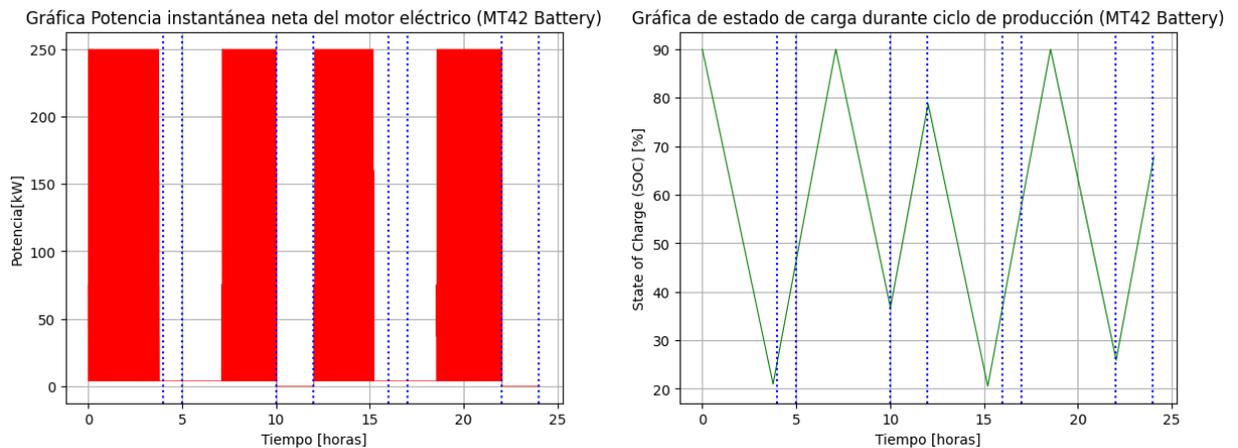


Figura 5.14: Resultados Simulación 1 de potencia instantánea y SOC durante 24 [h] de operación para el UMT MT42 Battery. Punteo azul indica los intervalos de tiempo de descanso.

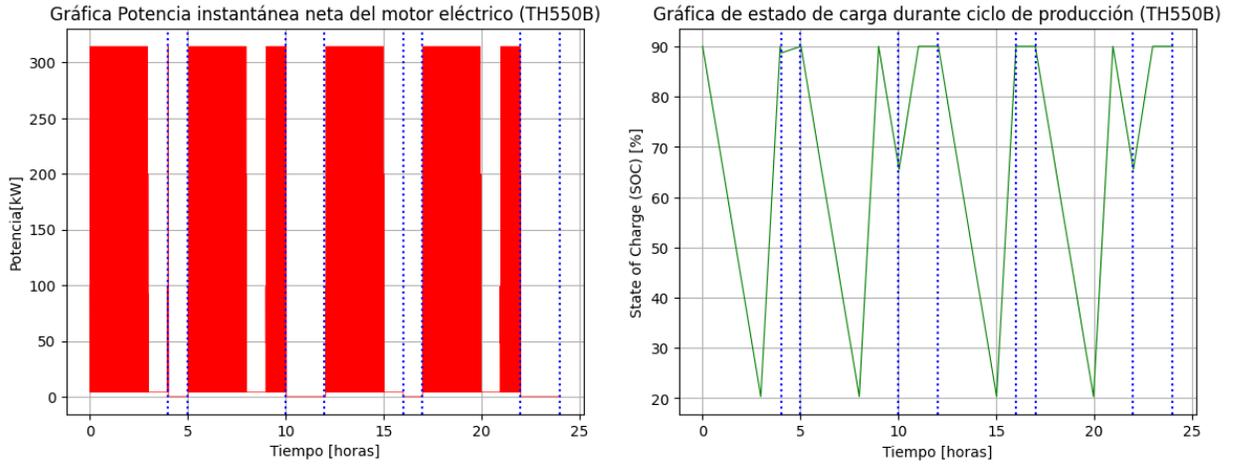


Figura 5.15: Resultados Simulación 1 de potencia instantánea y SOC durante 24 [h] de operación para el UMT TH550B. Punteo azul indica los intervalos de tiempo de descanso.

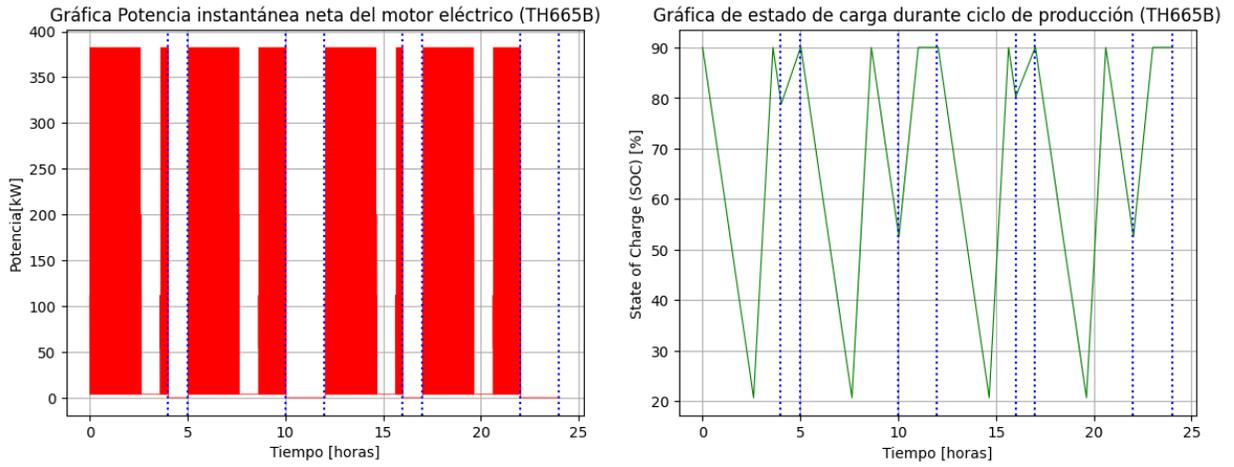


Figura 5.16: Resultados Simulación 1 de potencia instantánea y SOC durante 24 [h] de operación para el UMT TH665B. Punteo azul indica los intervalos de tiempo de descanso.

Los resultados de las 4 simulaciones realizadas se muestran en la Tabla 5.7, además, se agregan los resultados obtenidos para los casos donde la pendiente de los tramos hacia los puntos de extracción es de 5° y -5° .

Tabla 5.7: Resultados Simulación 1 de UMT operando en grafo caso base durante 24 [h], bajo condiciones de pendiente hacia puntos de extracción de 0° , 5° y -5° .

Resultados Simulación 1 de UMT durante 24h y 40 puntos de extracción (pendiente 0°)											
Modelo	Carga útil [ton]	Capacidad Batería [kWh]	Consumo energético [kWh]	Tiempo total [seg]	Tiempo total [h]	SOC Final [%]	Toneladas [ton]	Cargas Batería	Consumo por Ton [kWh/ton]	Productividad [ton/h]	Cant PE Visitados
MT2010 Battery	20	165	372	86401	24,00	90	3680	4	0,101	153,33	184
MT42 Battery	42	375	775	86568	24,05	68	10416	4	0,074	433,16	248
TH550B	50	354	1017	86468	24,02	90	13450	7	0,076	559,98	269
TH665B	65	354	1175	86557	24,04	90	17485	8	0,067	727,22	269
Resultados Simulación 1 de UMT durante 24h y 40 puntos de extracción (pendiente 5°)											
Modelo	Carga útil [ton]	Capacidad Batería [kWh]	Consumo energético [kWh]	Tiempo total [seg]	Tiempo total [h]	SOC Final [%]	Toneladas [ton]	Cargas Batería	Consumo por Ton [kWh/ton]	Productividad [ton/h]	Cant PE Visitados
MT2010 Battery	20	165	217	86401	24,00	90	4760	4	0,046	198,33	238
MT42 Battery	42	375	269	86602	24,06	90	14070	4	0,019	584,88	335
TH550B	50	354	339	86468	24,02	90	17250	4	0,020	718,18	345
TH665B	65	354	250	86468	24,02	90	22425	4	0,011	933,64	345
Resultados Simulación 1 de UMT durante 24h y 40 puntos de extracción (pendiente -5°)											
Modelo	Carga útil [ton]	Capacidad Batería [kWh]	Consumo energético [kWh]	Tiempo total [seg]	Tiempo total [h]	SOC Final [%]	Toneladas [ton]	Cargas Batería	Consumo por Ton [kWh/ton]	Productividad [ton/h]	Cant PE Visitados
MT2010 Battery	20	165	487	86426	24,01	90	3080	6	0,158	128,29	154
MT42 Battery	42	375	945	86401	24,00	90	7224	4	0,131	301,00	172
TH550B	50	354	1670	86401	24,00	90	12600	8	0,133	524,99	252
TH665B	65	354	1838	86491	24,03	90	14820	8	0,124	616,85	228

Al analizar los resultados de la Tabla 5.7, se puede notar que el caso donde la pendiente hacia los puntos de extracción es 5° es el de mayor productividad y de menor consumo energético por tonelada transportada, mientras que el caso donde la pendiente es -5° se tiene la menor productividad y el mayor consumo energético. Estas diferencias se deben a que cuando la pendiente es de 5° los vehículos aumentan su gasto energético en el tramo de ida debido a la pendiente, pero en la vuelta hacia el pique la pendiente es negativa y el vehículo tiene un gasto energético casi nulo ya que solo debe acelerar al inicio, mientras que cuando la pendiente es -5° la ida hacia el punto de extracción tiene un bajo consumo energético pero la vuelta hacia el pique tiene un consumo energético notablemente mayor debido a la pendiente positiva y al aumento de la masa del vehículo debido al mineral que transporta. Es decir, el caso donde la pendiente es -5° es el mas desfavorable debido a que los vehículos deben subir tramos con pendiente estando cargados de mineral. Este comportamiento es mas notable que con los LHD debido al mayor peso y carga útil de los UMT.

Se realizó una simulación extra de peor condición considerando que los vehículos en todos los tramos suben una pendiente de 5° , es decir, en el tramo de ida hacia los puntos de extracción la pendiente es 5° y en el tramo de vuelta hacia el pique la pendiente también es 5° , los resultados de esta simulación se muestran en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8: Resultados Simulación 1 de UMT operando en grafo caso base durante 24 [h] (peor condición).

Resultados Simulación 1 de UMT durante 24h y 1 buzón para cargar mineral											
Modelo	Carga útil [ton]	Capacidad Batería [kWh]	Consumo energético [kWh]	Tiempo total [seg]	Tiempo total [h]	SOC Final [%]	Toneladas [ton]	Cargas Batería	Consumo por Ton [kWh/ton]	Productividad [ton/h]	Cant PE Visitados
MT2010 Battery	20	165	729,352	86401	24,00	90	2440	8	0,291	101,67	122
MT42 Battery	42	375	1094,454	86489	24,01	90	4704	6	0,229	199,42	112
TH550B	50	354	2367,363	86460	24,00	90	9600	12	0,243	408,33	192
TH665B	65	354	2533,273	86401	24,00	90	11310	12	0,222	482,08	174

Al comparar los resultados mostrados en la Tabla 5.8 con los de pendiente 0° en la Tabla 5.7, se puede notar que en la peor condición el consumo energético es casi el doble, la productividad se reduce en promedio un 38,1% y el consumo energético por tonelada transportada aumenta el doble. Estos resultados muestran la importancia de que existan condiciones adecuadas en los tramos donde los UMT transitan.

5.2.3. Simulación 2: Operación UMT en Nivel de transporte intermedio

A continuación se presentan los resultados de la simulación 2 de 24 horas de operación de cada modelo de UMT, bajo el modo de cambio de batería y considerando que la pendiente de todos los tramos recorridos es de 0°.

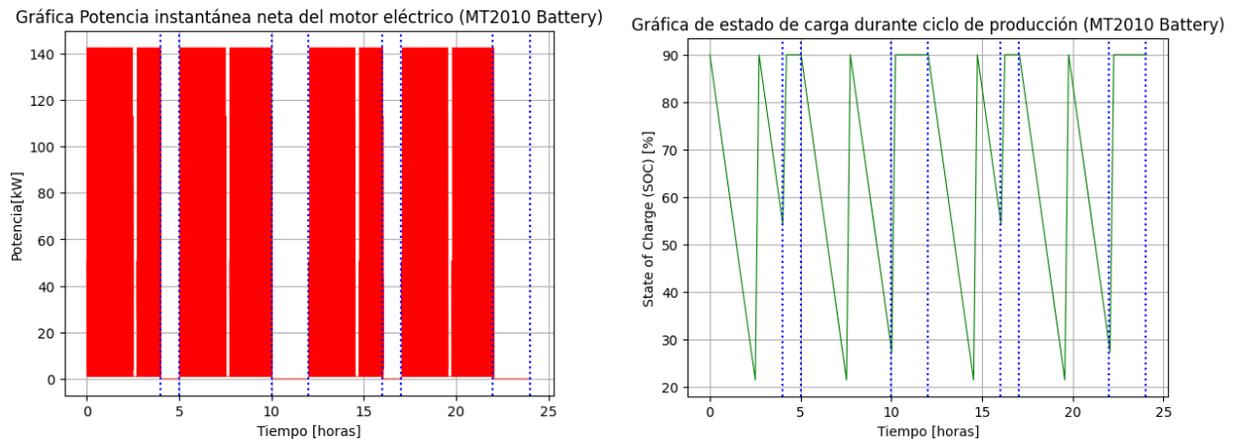


Figura 5.17: Resultados Simulación 2 de potencia instantánea y SOC durante 24 [h] de operación para el UMT MT2010 Battery. Punteo azul indica los intervalos de tiempo de descanso.

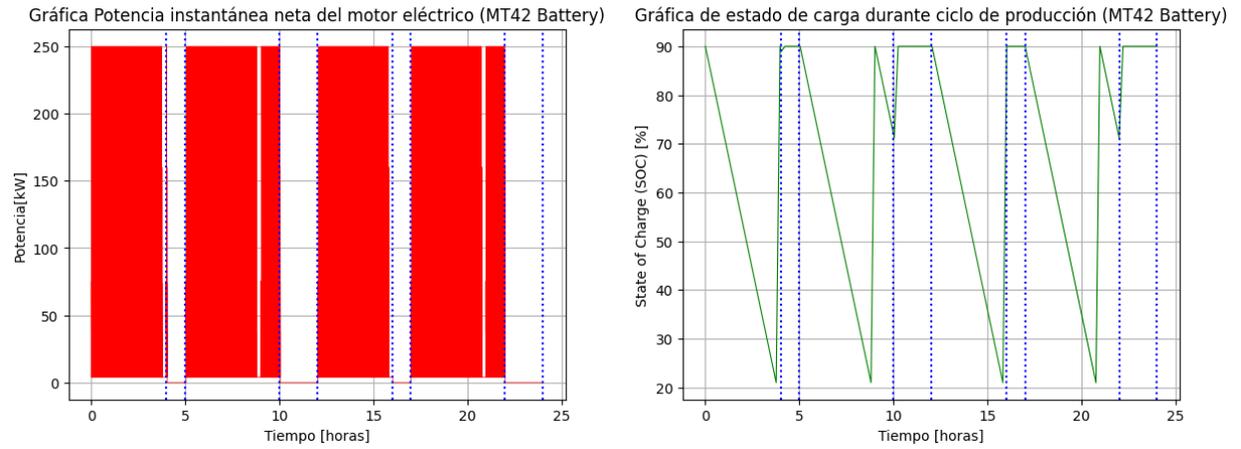


Figura 5.18: Resultados Simulación 2 de potencia instantánea y SOC durante 24 [h] de operación para el UMT MT42 Battery. Punteo azul indica los intervalos de tiempo de descanso.

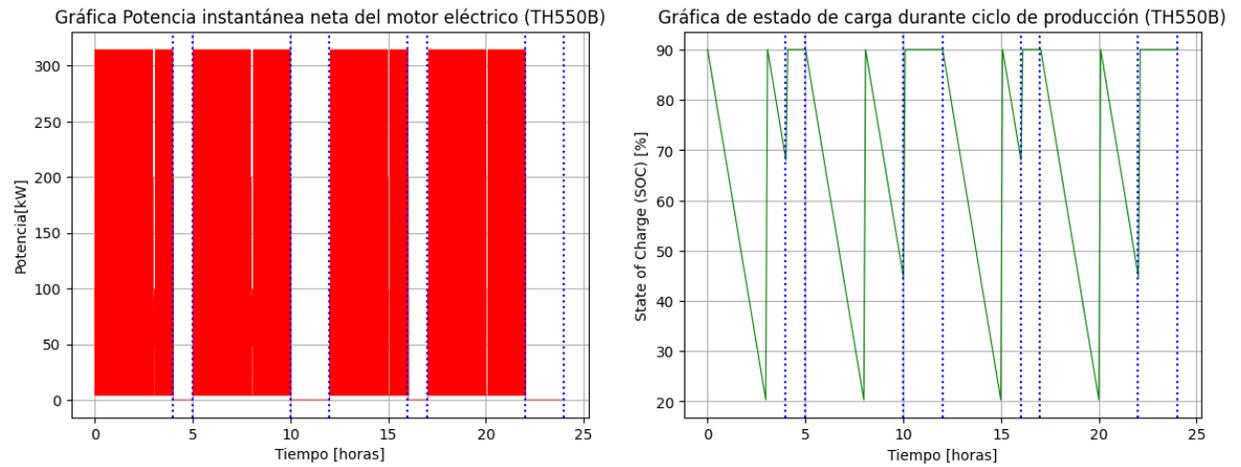


Figura 5.19: Resultados Simulación 2 de potencia instantánea y SOC durante 24 [h] de operación para el UMT TH550B. Punteo azul indica los intervalos de tiempo de descanso.

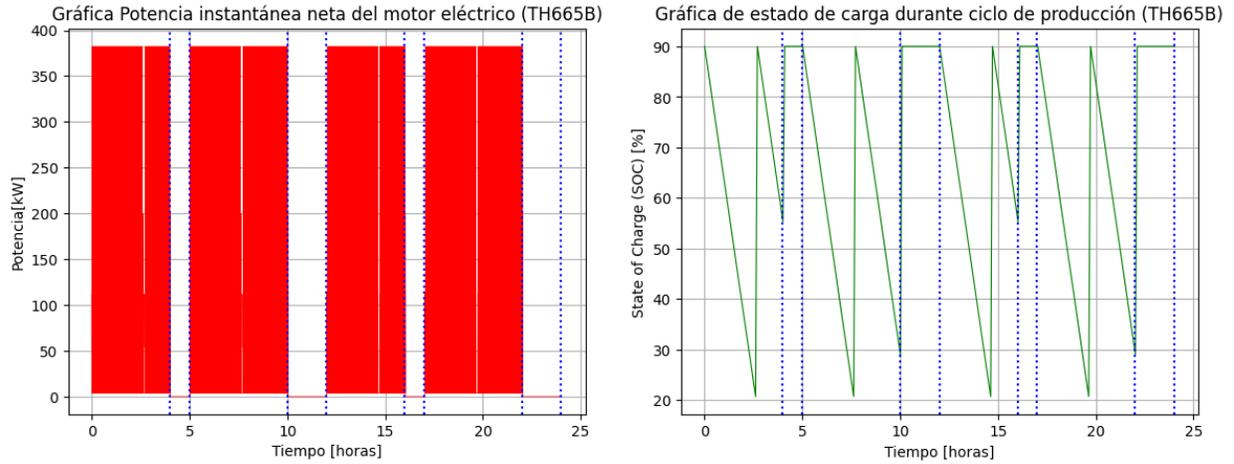


Figura 5.20: Resultados Simulación 2 de potencia instantánea y SOC durante 24 [h] de operación para el UMT TH665B. Punteo azul indica los intervalos de tiempo de descanso.

Los resultados de las 4 simulaciones realizadas se muestran en la Tabla 5.9, además, se agregan los resultados obtenidos para los casos donde la pendiente de los tramos hacia los puntos de extracción es de 5° y -5° .

Tabla 5.9: Resultados Simulación 2 de UMT operando en grafo caso base durante 24 [h], bajo condiciones de pendiente hacia puntos de extracción de 0° , 5° y -5° .

Resultados Simulación 2 de UMT durante 24h y 40 puntos de extracción (pendiente 0°)											
Modelo	Carga útil [ton]	Capacidad Batería [kWh]	Consumo energético [kWh]	Tiempo total [seg]	Tiempo total [h]	SOC Final [%]	Toneladas [ton]	Cargas Batería	Consumo por Ton [kWh/ton]	Productividad [ton/h]	Cant PE Visitados
MT2010 Battery	20	165	639	86618	24,06	90	6320	8	0,101	262,67	316
MT42 Battery	42	375	998	86432	24,01	90	13398	7	0,074	558,04	319
TH550B	50	354	1278	86535	24,04	90	16900	8	0,076	703,07	338
TH665B	65	354	1475	86535	24,04	90	21970	8	0,067	913,99	338
Resultados Simulación 2 de UMT durante 24h y 40 puntos de extracción (pendiente 5°)											
Modelo	Carga útil [ton]	Capacidad Batería [kWh]	Consumo energético [kWh]	Tiempo total [seg]	Tiempo total [h]	SOC Final [%]	Toneladas [ton]	Cargas Batería	Consumo por Ton [kWh/ton]	Productividad [ton/h]	Cant PE Visitados
MT2010 Battery	20	165	295	86456	24,02	90	6460	6	0,046	268,99	323
MT42 Battery	42	375	269	86602	24,06	90	14070	4	0,019	584,88	335
TH550B	50	354	339	86467	24,02	90	17250	4	0,020	718,19	345
TH665B	65	354	250	86535	24,04	90	22425	4	0,011	932,92	345
Resultados Simulación 2 de UMT durante 24h y 40 puntos de extracción (pendiente -5°)											
Modelo	Carga útil [ton]	Capacidad Batería [kWh]	Consumo energético [kWh]	Tiempo total [seg]	Tiempo total [h]	SOC Final [%]	Toneladas [ton]	Cargas Batería	Consumo por Ton [kWh/ton]	Productividad [ton/h]	Cant PE Visitados
MT2010 Battery	20	165	950	86550	24,04	90	6000	12	0,158	249,57	300
MT42 Battery	42	375	1726	86401	24,00	90	13188	8	0,131	549,49	314
TH550B	50	354	2194	86602	24,06	90	16550	12	0,133	687,97	331
TH665B	65	354	2636	86542	24,04	90	21255	14	0,124	884,17	327

Al analizar los resultados de la Tabla 5.9, se puede ver nuevamente que el caso donde la pendiente hacia los puntos de extracción es 5° es el de mayor productividad y de menor consumo energético por tonelada transportada, mientras que el caso donde la pendiente es -5° se tiene la menor productividad y el mayor consumo energético.

Se realizó una simulación extra de peor condición considerando que los vehículos en todos los tramos suben una pendiente de 5° , es decir, en el tramo de ida hacia los puntos de extracción la pendiente es 5° y en el tramo de vuelta hacia el pique la pendiente también es 5° , los resultados de esta simulación se muestran en la Tabla 5.10.

Tabla 5.10: Resultados Simulación 2 de UMT operando en grafo caso base durante 24 [h] (peor condición).

Resultados Simulación 2 de UMT durante 24h y 1 buzón para cargar mineral (peor condición)											
Modelo	Carga útil [ton]	Capacidad Batería [kWh]	Consumo energético [kWh]	Tiempo total [seg]	Tiempo total [h]	SOC Final [%]	Toneladas [ton]	Cargas Batería	Consumo por Ton [kWh/ton]	Productividad [ton/h]	Cant PE Visitados
MT2010 Battery	20	165	1649	86448	24,04	90	5520	18	0,291	239,60	276
MT42 Battery	42	375	2880	86512	24,02	90	12390	14	0,229	536,86	295
TH550B	50	354	3941	86610	24,02	90	16000	18	0,243	693,27	320
TH665B	65	354	4543	86490	24,04	90	20280	22	0,221	881,28	312

Al comparar los resultados mostrados en la Tabla 5.5 con los de pendiente 0° en la Tabla 5.4, se puede notar que en la peor condición el consumo energético es mas del el doble, la productividad se reduce en promedio un 8,67% y el consumo energético por tonelada transportada aumenta el doble. Al comparar con los resultados de la simulación 1 la diferencia principal es que la reducción de la productividad en el peor caso es menor, esto se debe a que si bien en este caso la batería se descarga mas rápido, el modo de carga rápida o el de cambio de batería aumenta las horas efectivas de trabajo, y por tanto, la productividad.

Luego de tener los resultados de las dos simulaciones con distintos tipos de carga de batería, se comparan los resultados de las tablas 5.7 y 5.9, se puede notar que en cuanto a consumo energético por tonelada transportada todos los vehículos tienen un consumo promedio de 100 [Wh/ton], las diferencias entre estos es mínima. Al observar la productividad se ve un clara diferencia entre cada UMT debido a las diferencias de capacidad de carga útil que poseen, también se hace relevante la capacidad de la batería del UMT en la productividad, por ello el MT2010 battery tiene una productividad inferior a los otros vehículos.

Los resultados de la simulación 2 son notablemente superiores en cuanto a productividad, esto se debe a los tiempos de cambio de batería utilizados que son mucho menores a cargar la batería abordo. Se debe notar que se considera que siempre hay disponibilidad de baterías cargadas al momento de requerir cambiar la batería, considerar que esta disponibilidad tiene la limitante de ser costosa debido a que se requiere tener baterías extras que tienen un alto costo.

En la simulación 1 se podrían mejorar los resultados obtenidos si la hora de colación deja de ser inamovible y se toma justo cuando se requiera cargar la batería, ya que la simulación actual interrumpe la operación para cumplir con la hora de colación.

Al comparar los resultados de los UMT con los de los LHD, la principal diferencia es que el consumo energético por tonelada transportada de los UMT es aproximadamente 50% menor y las productividades son mucho mayores, diferencia que se debe a la gran capacidad de carga útil de estos vehículos.

5.3. Indicadores de evaluación de desempeño de las alternativas tecnológicas

Con el objetivo de evaluar el desempeño de los vehículos eléctricos utilizados, se definió un conjunto de vehículos diésel que se ofertan en el mercado actual y que tiene características similares a cada uno de los vehículos eléctricos evaluados. En la Tabla 5.11 se muestra el conjunto de vehículos diésel seleccionado.

Tabla 5.11: Conjunto de vehículos diésel con características similares a los vehículos eléctricos.

Vehículos diésel similares a vehículos eléctricos seleccionados					
LHD Eléctricos	Capacidad de carga útil [ton]	Potencia Motor [kW]	LHD Diésel	Capacidad de carga útil [ton]	Potencia Motor [kW]
ST7 Battery	6,8	149	LH307	7	160
ST14 Battery	14	200	ST14	14	250
R1700 XE	15	217	LH517i	17,2	310
LH518B	18	540	ST18	17,5	352
UMT Eléctricos	Capacidad de carga útil [ton]	Potencia Motor [kW]	UMT Diésel	Capacidad de carga útil [ton]	Potencia Motor [kW]
MT2010 Battery	20	301	TH320	20	235
MT42 Battery	42	400	MT42	42	399
TH550B	50	720	TH55li	51	515
TH665B	65	720	TH663i	63	565

Estos vehículos diésel que actualmente son utilizados en la mayoría de las mineras en el mundo, servirán de referencia para evaluar los nuevos vehículos eléctricos en base a los siguientes indicadores de desempeño:

5.3.1. Costo de operación

Inicialmente para estimar el costo de operación de cada uno de los vehículos diésel es necesario conocer la potencia nominal y el modelo del motor de tracción que utilizan, con esto será posible conocer su consumo de combustible. En la Tabla 5.12 se muestran las características de cada vehículo diésel estudiado.

Tabla 5.12: Características específicas de conjunto de vehículos diésel mineros.

Vehículos diésel					
LHD Diésel	Capacidad de carga útil [ton]	Potencia Motor [kW]	Motor	Consumo de combustible [L/kWh]	Tanque combustible [L]
LH307	7	160	Volvo TAD850VE	0,29	260
ST14	14	250	Cummins QSM11	0,26	390
LH517i	17,2	310	Volvo TAD1342VE	0,26	595
ST18	17,5	352	Cummins QSX15	0,32	626
UMT Diésel	Capacidad de carga útil [ton]	Potencia Motor [kW]	Motor	Consumo de combustible [L/kWh]	Tanque combustible [L]
TH320	20	235	Volvo TAD853	0,28	340
MT42	42	399	Cummins X15	0,25	580
TH551i	51	515	Volvo TAD1642VE-B	0,25	840
TH663i	63	565	Volvo TAD1643VE-B	0,25	850

Al igual que con los vehículos eléctricos, se recopiló información de los datasheet de los vehículos diésel y se simuló su operación dentro de la mina, con esto se pudo obtener el consumo energético diario de estos vehículos. Con la información del motor y el consumo energético diario, se puede estimar el costo de operación de cada vehículo, esto se realizará considerando que el precio del diésel será el precio promedio en Chile en el 2022 y el tiempo efectivo de operación será de 18 horas, pues los turnos son de 10 horas con una hora de descanso a mitad del turno, de modo que se deja cargando el combustible al iniciar el descanso y al terminar el turno. La estimación de estos costos se muestra en la Tabla 5.13.

Tabla 5.13: Estimación de costo de operación de LHD y UMT diésel.

LHD Diésel	Energía consumida 1 día [kWh]	Consumo de combustible [L]	Tiempo efectivo [h]	Precio combustible [USD/ L]	Costo de operación diario [USD]
LH307	574	168,61	18	0,83	140
ST14	1227	320,49	18	0,83	267
LH517i	1534	392,65	18	0,83	327
ST18	1551	502,31	18	0,83	418
UMT Diésel	Energía consumida 1 día [kWh]	Consumo de combustible [L]	Tiempo efectivo [h]	Precio combustible [USD/ L]	Costo de operación diario [USD]
TH320	622	174,00	18	0,83	145
MT42	973	243,25	18	0,83	202
TH551i	1219	304,75	18	0,83	254
TH663i	1248	312,00	18	0,83	260

Por otro lado, para estimar el costo de operación de cada uno de los vehículos eléctricos estudiados es necesario conocer el precio de la energía en el punto donde se tiene el consumo eléctrico. Para ello, se promedió el costo marginal de la barra Minero110 durante todo el 2022, esta se encuentra en la subestación Minero que suministra energía a Codelco División

El Teniente. Utilizando los resultados de consumo energético de las dos simulaciones de LHD y UMT realizadas anteriormente, se estimó el costo de operación de los vehículos eléctricos, esto se muestra en la Tabla 5.14.

Tabla 5.14: Estimación de costo de operación de LHD y UMT eléctricos, con carga de batería a bordo y con cambio de batería.

LHD Eléctricos	Precio energía [USD/MWh]	Con carga a bordo			Con cambio de batería o carga rápida		
		Tiempo efectivo [h]	Energía consumida 1 día [kWh]	Costo de operación diario [USD]	Tiempo efectivo [h]	Energía consumida 1 día [kWh]	Costo de operación diario [USD]
ST7	108,76	13,4	460	50	17,2	589	64
ST14	108,76	11,8	841	91	17,2	1223	133
R1700 XE	108,76	15,0	1319	143	15,9	1397	152
LH518B	108,76	14,0	1247	136	17,6	1562	170
UMT Eléctricos	Precio energía [USD/MWh]	Tiempo efectivo [h]	Energía consumida 1 día [kWh]	Costo de operación diario [USD]	Tiempo efectivo [h]	Energía consumida 1 día [kWh]	Costo de operación diario [USD]
MT2010 Battery	108,76	10,0	372	40	17,2	639	70
MT42 Battery	108,76	13,4	775	84	17,2	998	109
TH550B	108,76	14,0	1017	111	17,6	1278	139
TH665B	108,76	14,0	1175	128	17,6	1475	160

En la Tabla 5.14 se observa que el costo de operación de los vehículos eléctricos utilizando cambio de batería o carga rápida es notablemente mayor al de los que utilizan carga a bordo, esto se debe a que la carga a bordo tiene un tiempo mucha mayor al cambio de batería, provocando que el tiempo efectivo de operación sea menor y a su vez disminuyan las toneladas diarias extraídas. El escenario de carga a bordo requiere de menor inversión pues solo se necesita una batería, mientras que el escenario de cambio de batería necesita tener varias baterías extras que estén cargando mientras el vehículo opera, el beneficio de esta inversión sería un aumento de la productividad similar a la de los vehículos diésel.

Al comparar la tablas 5.13 y 5.14, se observa que el costo de operación de los vehículos diésel es notablemente mayor, siendo específicos es en promedio 202% mas costoso que los vehículos eléctricos, la única ventaja de los equipos diésel es que tienen un tiempo efectivo de operación mayor ya que no pierden demasiado tiempo cargado combustible. En líneas generales estos resultados muestran que existe un gran ahorro de costos de operación con los vehículos eléctricos, pero el costo de inversión sigue siendo mayor a los de diésel debido a la necesidad de baterías extras.

5.3.2. Emisiones

Para estimar las emisiones de CO₂ de los vehículos diésel se utiliza el factor de emisiones de CO₂ del diésel que es de 2,67 [kgCO₂eq/L] [34], mientras que para los vehículos eléctricos al no tener emisiones de CO₂ se consideran las emisiones producidas para suministrar la energía que necesitan, estas emisiones se calcularon con el factor de emisiones GEI del Sistema Eléctrico Nacional [35] promediado en el año 2022, el cual es de 0,3 [kgCO₂eq/ kWh]. En la Tabla 5.15 se muestran las emisiones anuales de cada uno de los vehículos estudiados.

Tabla 5.15: Estimación de costo de operación de LHD y UMT eléctricos, con carga de batería a bordo y con cambio de batería.

Comparación de emisiones de vehículos eléctricos vs vehículos diésel							
LHD Eléctricos	Energía consumida 1 día [kWh]	Emisiones diarias [ton de CO2]	Emisiones Anuales [ton de CO2]	LHD Diésel	Consumo de combustible [L]	Emisiones Diarias [ton de CO2]	Emisiones Anuales [ton de CO2]
ST7	589	0,18	64,60	LH307	168,61	0,45	164,32
ST14	1223	0,37	134,18	ST14	320,49	0,86	312,34
R1700 XE	1397	0,42	153,29	LH517i	392,65	1,05	382,66
LH518B	1562	0,47	171,42	ST18	502,31	1,34	489,53
UMT Eléctricos	Energía consumida 1 día [kWh]	Emisiones diarias [ton de CO2]	Emisiones Anuales [ton de CO2]	UMT Diésel	Consumo de combustible [L]	Emisiones Diarias [ton de CO2]	Emisiones Anuales [ton de CO2]
MT2010 Battery	639	0,19	70,16	TH320	174,00	0,46	169,57
MT42 Battery	998	0,30	109,49	MT42	243,25	0,65	237,06
TH550B	1278	0,38	140,21	TH551i	304,75	0,81	296,99
TH665B	1475	0,44	161,87	TH663i	312,00	0,83	304,06

Al comparar las emisiones de vehículos eléctricos y diésel, se nota que en promedio la emisiones anuales de los vehículos diésel son 240% mayores a las emisiones anuales de los vehículos eléctricos. Estos resultados reflejan porque la industria minera actualmente busca electrificar sus operaciones, los vehículos eléctricos son una alternativa mucho más limpia, que incluso tiene la posibilidad de tener cero emisiones si se logra que el suministro eléctrico de la minera sea 100% renovable.

5.4. Integración de generación renovable

Los resultados anteriores permitieron conocer la demanda energética de cada modelo de LHD y UMT, con esto fue posible conocer cuanto tiempo puede operar cada vehículo dentro del caso base definido. El tiempo de descarga de la batería obtenido se muestra en la Tabla 5.16.

Tabla 5.16: Resumen de tiempos de carga, descarga y cambio de baterías para cada uno de los LHD y UMT (pendiente 0°).

		Tiempos de carga, descarga y cambio de baterías (pendiente 0°)			
Modelo	Capacidad Batería [kWh]	Tiempo Carga Batería a bordo (lenta) [min]	Tiempo Carga Batería rápida particular [min]	Tiempo Descarga Batería [min]	Tiempo Descarga Batería [seg]
ST7	165	152,3	12,0	199,7	11982
ST14	300	122,2	12,0	176,1	10568,7
R1700 XE	213	25,6	15,2	98,8	5929
LH518B	353	58,8	5,0	165,9	9951
Modelo	Capacidad Batería [kWh]	Tiempo Carga Batería a bordo (lenta) [min]	Tiempo Carga Batería rápida particular [min]	Tiempo Descarga Batería [min]	Tiempo Descarga Batería [seg]
MT2010 Battery	165	152,3	12,0	150,2	9013
MT42 Battery	375	200,0	12,0	226,1	13565
TH550B	354	59,0	5,0	178,5	10708
TH665B	354	59,0	5,0	156,6	9395

En la Tabla 5.16 se observa que el tiempo de carga de la batería es menor al tiempo de descarga, por ello solo será necesario tener 2 baterías, una en el vehículo y la otra cargando, la demanda en la red sera un potencia constante de duración tiempo de carga de batería que aparecerá cada vez que hacemos el cambio de batería, por lo cual la demanda en la red no superará la potencia de carga de una batería. Sin embargo, al simular la operación de los vehículos bajo la peor condición anteriormente mencionada, se obtuvieron tiempos de descarga menores, mostrados en la Tabla 5.17.

Tabla 5.17: Resumen de tiempos de carga, descarga y cambio de baterías para cada uno de los LHD y UMT (peor condición).

		Tiempos de carga, descarga y cambio de baterías (peor condición)			
Modelo	Capacidad Batería [kWh]	Tiempo Carga Batería a bordo (lenta) [min]	Tiempo Carga Batería rápida particular [min]	Tiempo Descarga Batería [min]	Tiempo Descarga Batería [seg]
ST7	165	152,3	12,0	81,2	4873
ST14	300	122,2	12,0	74,2	4450
R1700 XE	213	25,6	15,2	43,5	2612
LH518B	353	58,8	5,0	69,6	4173
Modelo	Capacidad Batería [kWh]	Tiempo Carga Batería a bordo (lenta) [min]	Tiempo Carga Batería rápida particular [min]	Tiempo Descarga Batería [min]	Tiempo Descarga Batería [seg]
MT2010 Battery	165	152,3	12,0	57,1	3424
MT42 Battery	375	200,0	12,0	78,2	4690
TH550B	354	59,0	5,0	57,7	3460
TH665B	354	59,0	5,0	48,7	2920

En la Tabla 5.17, se observa que el tiempo de descarga de la batería es inferior al tiempo de carga de la batería, este caso será analizado en la Figura 5.21.

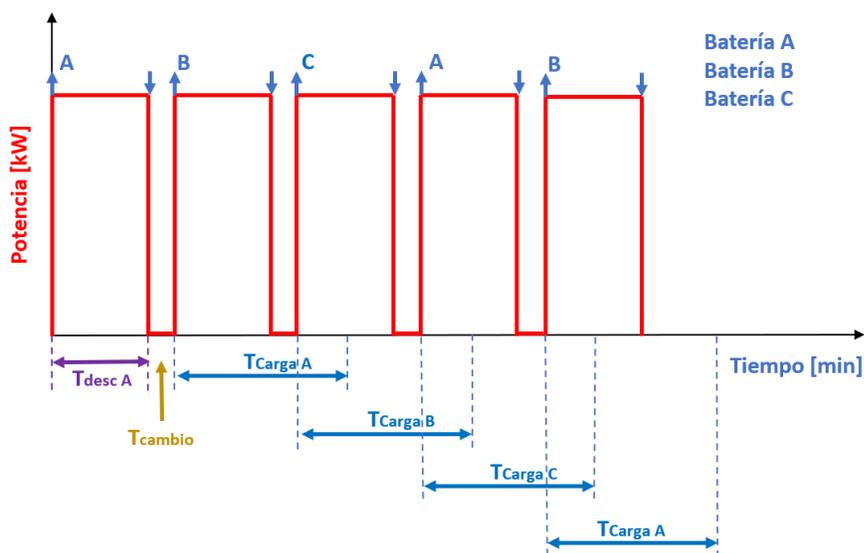


Figura 5.21: Visualización de cambios de batería en gráfica de potencia consumida por un vehículo durante ciclo de operación.

En la Figura 5.21, se ve que se requieren 3 baterías A, B y C, para mantener sin interrupciones el ciclo de operación, sólo se tendrán pausas para cambiar baterías. La parte inferior de la figura muestra que luego de que la batería A se descarga (llega a SOCmin establecido), se tiene un tiempo de cambio de batería y al final de este inicia el proceso de carga, aumentando la potencia demandada a la red a la de una batería. Luego al repetir el proceso con la batería B se observa que existe un traslape donde será necesario cargar 2

baterías aumentando el doble la demanda de la red. Basado en esta explicación se construirá el perfil de demanda de la red, al estar operando el LHD ST7 Battery continuamente durante 24 horas, sin considerar tiempos de descanso, el perfil resultante se muestra en la Figura 5.22.

Además utilizando el explorador solar, se hace una prueba con arreglos fotovoltaicos con capacidad instalada de 260 [kW] (doble de demanda máxima) y de 520 [kW], ubicado en coordenadas $-22,57^\circ$ de latitud y $-68,73^\circ$ de longitud, a una distancia de 32 [km] de Chuquicamata Subterránea, para observar la oferta de generación, los resultados se muestran en la Figura 5.22.

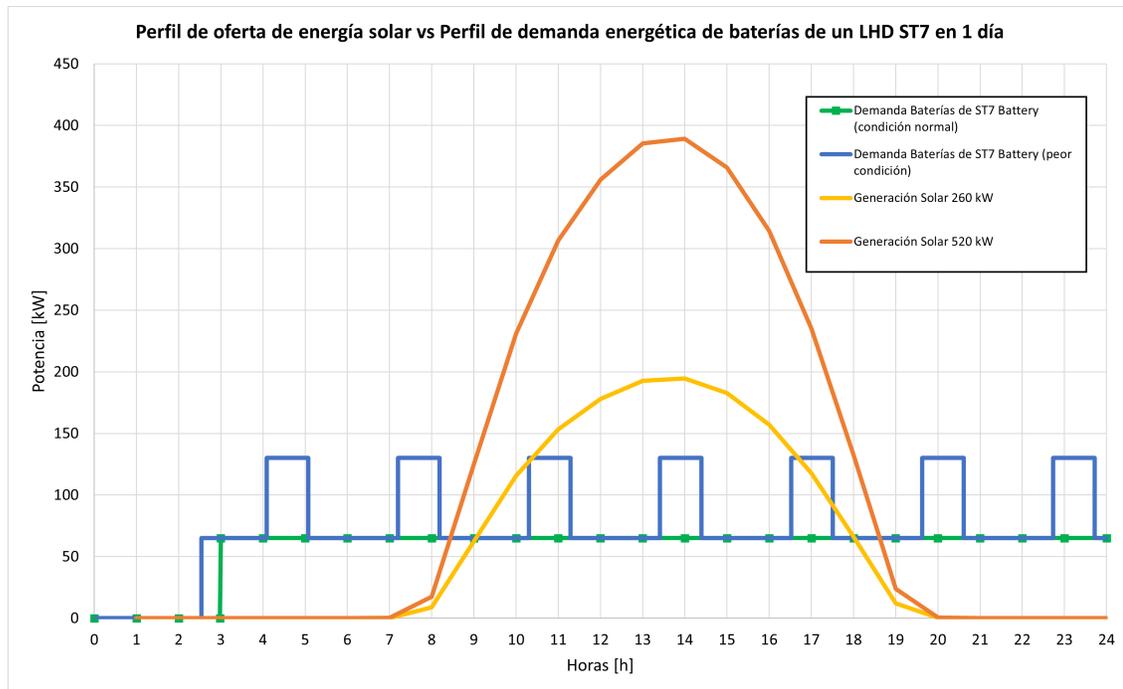


Figura 5.22: Perfil de demanda de la red al estar operando el LHD ST7 Battery continuamente durante 24 horas vs Generación diaria promedio de fotovoltaica cercana a Chuquicamata Subterránea.

En la Figura 5.22, al tener la oferta y la demanda superpuestas, se observa que la generación fotovoltaica puede entregar 130 [kW] de potencia constantes desde las 9:00 hasta las 16:00, es decir, durante 5 horas la generación fotovoltaica puede suministrar completamente la demanda del ST7 Battery. Claramente esto no es suficiente para que el equipo opere durante los dos turnos, se puede incrementar la potencia instalada del arreglo fotovoltaico aumentando notablemente la potencia durante las 8:00 y 17:00, en las horas restantes la generación es nula.

La estrategia ideal sería encontrar una forma de desplazar esa demanda en las horas donde no hay generación a las horas con sol, ya que, la potencia generada dependerá de la radiación y la potencia instalada del arreglo fotovoltaico, la cual se puede aumentar. Se podrían comprar baterías extras y cargarlas durante las horas de sol para usarlas cuando no hay generación, esta solución tiende a ser muy costosa y requiere de estaciones de carga de baterías mas grandes para almacenar esas baterías cargadas. Otra opción es intentar evitar tiempos

de descanso en horas de sol, como por ejemplo el tiempo de dos horas para cambiar de turno, esta solución tendría la complejidad de cambiar totalmente los horarios de los turnos, pero igualmente seguirían existiendo horas sin generación alguna y una demanda de potencia en la red.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajo futuro

El objetivo general de este trabajo es analizar el desempeño de equipos mineros eléctricos con respecto a equipos mineros diésel, para contribuir a la integración de generación en base a fuentes de energía renovable, con énfasis en minería subterránea. Para cumplir este objetivo, se procedió a investigar el mercado de vehículos mineros subterráneos, para identificar alternativas de electrificación que permitieran contribuir a la integración de generación renovable. Se logró caracterizar el estado actual de las alternativas eléctricas de camiones de acarreo subterráneos y camiones LHD, enfocándose principalmente en las alternativas que utilizan baterías.

Luego de tener identificados los distintos vehículos mineros eléctricos a batería, se generó un escenario base del sistema de manejo de minerales, para realizar esto se programó en python un grafo para simular la operación dentro de la mina, los nodos de este grafo correspondían a los puntos de extracción de mineral, al pique de vaciado de mineral y a la estación de carga de baterías, logrando simular la operación del nivel de producción y el nivel de transporte intermedio. Se consideraron las dimensiones de una malla de extracción tipo Teniente de 16x20 [m], pues es una malla típica en Chuquicamata y El Teniente.

Al estar completo el escenario base del sistema de manejo de minerales y de tener identificados los vehículos mineros, se programó un modelo de consumo energético de los vehículos mineros, que permite estimar la potencia instantánea consumida por un vehículo minero durante 24 horas de operación. Este modelo utiliza principalmente los datos que se especifican en los datasheet de los vehículos mineros, la potencia estimada se debe principalmente a la operación del motor de tracción y del motor auxiliar que permite el accionamiento de un brazo hidráulico para cargar o descargar mineral.

El modelo de consumo energético permitió estimar el perfil de consumo energético de cada vehículo minero estudiado, así como también el estado de carga de la batería durante la operación de 24 horas. Este perfil de consumo fue comparado con un perfil de oferta de energía solar, se pudo observar que no es posible suministrar el 100 % de la energía que requieren los vehículos mineros utilizando únicamente energía solar, pues es posible construir una central fotovoltaica sobredimensionada para que en situaciones de baja radiación solar sea posible suministrar la potencia máxima requerida para cargar las baterías de los vehículos que están operando en la mina, pero esto solo durante las horas de sol. En el intervalo de tiempo entre las 19:00 hrs y 6:00 hrs no se tiene radiación solar, por lo cual si se quiere utilizar únicamente

energía renovable es necesario incorporar otros tipos de energía como eólica, hidroeléctrica o incorporar un sistema de almacenamiento de energía.

Buscando visualizar mejor el impacto de la electrificación de los vehículos mineros, se identificó un conjunto de vehículos mineros diésel con características similares al conjunto de vehículos eléctricos seleccionado, con esto se procedió a estimar costos de operación y emisiones anuales, los resultados obtenidos mostraron que los vehículos eléctricos son una alternativa mucho más sustentable, pues el costo de operación de los vehículos diésel es 208 % más alto y las emisiones son 240 % mayores, además de esto no se consideró el beneficio extra de los vehículos eléctricos en cuanto a las condiciones de salud para los trabajadores y la disminución de los requisitos de ventilación de la mina, que son de gran importancia.

Los resultados obtenidos muestran que se cumplieron los objetivos propuestos, debido a que la incorporación de vehículos mineros eléctricos a batería permitirá integrar en mayor medida la generación renovable en la minería, si bien aun no es posible suministrar el 100 % de energía renovable es una opción mucho menos contaminante y más barata al compararla con el gasto en combustible de otros vehículos. La principal diferencia observada entre los vehículos eléctricos y los diésel, es que en los casos donde los vehículos deben recorrer un tramo inclinado estando cargados de mineral su consumo energético aumenta, este aumento disminuye el tiempo de descarga de la batería y aumenta las interrupciones del ciclo de operación para cargar o cambiar la batería del vehículo, mientras que los vehículos diésel incluso siendo simulados en la peor condición de trabajo donde siempre suben pendientes de 5° lograban cumplir el turno sin realizar interrupciones para cargar el tanque de diésel. Las simulaciones mostraron que bajo condiciones ideales donde la pendiente del recorrido era 0°, los vehículos eléctricos tenían una productividad muy cercana a la de los vehículos diésel, ya que utilizando el cambio de baterías se lograba tener 17 horas de tiempo de trabajo efectivo cercano a las 18 horas de los vehículos diésel.

Estas alternativas eléctricas estudiadas aun están siendo probadas en diversas minas en el mundo, esta tecnología tiene un costo de inversión mayor a la diésel, debido a la necesidad de adquirir un conjunto de baterías extras. Para transicionar de una mina con vehículos diésel a operar una mina con únicamente vehículos mineros eléctricos, se requiere además de los equipos, construir las estaciones de carga de baterías en sitios estratégicos, entrenar al personal para operar adecuadamente estos vehículos y adecuar el sistema eléctrico de potencia para compensar el aumento de demanda eléctrica.

Como trabajo futuro, se puede mejorar la precisión del modelo de consumo energético utilizando un modelo de batería que utilice mas parámetros, por ejemplo, se podría utilizar un modelo de batería simple con una fuente de voltaje y resistencia que dependan del estado de carga de la batería. Por otra parte, se podría profundizar el trabajo realizando una comparación de los vehículos eléctricos con los diésel considerando los costos de inversión asociados a los vehículos, baterías y estaciones de carga de baterías. Para terminar, se propone desarrollar un modelo de optimización para analizar el comportamiento de una mayor cantidad de vehículos operando en conjunto dentro de la mina.

Bibliografía

- [1] Naciones Unidas, “Qué es el cambio climático,” 2022, <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change>.
- [2] Naciones Unidas, “El acuerdo de París,” 2022, <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>.
- [3] Gob.cl, “Un hito en la historia medioambiental de Chile: a partir de hoy contamos con nuestra primera ley marco de cambio climático,” 2022, <https://www.gob.cl/noticias/un-hito-en-la-historia-medioambiental-de-chile-partir-de-hoy-contamos-con-nuestra-primera-ley-marco-de-cambio-climatico/>.
- [4] COCHILCO, “Emisiones GEI en la minería del cobre al 2021 y análisis del contexto actual,” 2022,
- [5] Minero, C., “Metas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero de las empresas de la gran minería asociadas al Consejo Minero,” 2021, <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2022/02/Tabla-metas-CC-version-diciembre-2021.pdf>.
- [6] Ertugrul, N., Pourmousavi Kani, S. A., Davies, M., Sbarbaro, D., y Moran, L., “Status of mine electrification and future potentials,” pp. 151–156, 2020, doi:10.1109/SGES51519.2020.00034.
- [7] Halim, A., L. J. J. J., “Improvement of working conditions and opinions of mine workers when battery electric vehicles (BEVs) are used instead of diesel machines — results of field trial at the Kittilä mine, Finland,” *Mining, Metallurgy Exploration*, vol. 39, pp. 203–219, 2022, doi:<https://doi.org/10.1007/s42461-021-00506-8>.
- [8] Codelco, “Codelco estrenó el primer cargador subterráneo 100 % eléctrico de Sudamérica,” 2022,
- [9] PAN-AMERICANA, M., “Agnico Eagle probará la cargadora eléctrica de batería Sandvik LH518B,” 2022, <https://www.mineria-pa.com/productos-y-tecnologia/agnico-eagle-probara-la-cargadora-electrica-de-bateria-sandvik-lh518b/>.
- [10] Ingeoexpert, “La minería subterránea: ¿en qué consiste?,” 2019, <https://ingeoexpert.com/2019/01/18/la-mineria-subterranea-en-que-consiste/>.
- [11] Pardo, A. T., “Métodos de explotación subterránea,” 2020, <https://bsginstitute.com/bs-campus/blog/metodos-de-explotacion-subterranea-1135>.
- [12] Herbert, J. H., “Introducción a la minería subterránea. vol. iv: Métodos de explotación de interior,” 2020, <https://oa.upm.es/62726/>.
- [13] INACAP, “Extracción mina II: Apuntes Carguío y Transporte,” 2019, https://www.inacap.cl/web/material-apoyo-cedem/alumno/Mineria-y-Geomatica/AAI_OPEX02_Material_Extraccion_Mina_II_Carguio_y_Transporte.pdf.

- [14] CCM, “Ruta formativo-laboral extracción mina subterránea,” 2020, <https://www.ccm.cl/estandares-sectoriales/rutas/extraccion-subterranea/>.
- [15] Igogo, T., Awuah-Offei, K., Newman, A., Lowder, T., y Engel-Cox, J., “Integrating renewable energy into mining operations: Opportunities, challenges, and enabling approaches,” *Applied Energy*, vol. 300, p. 117375, 2021, doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117375>.
- [16] Piqueras, V. Y., “Perforación mediante jumbos,” 2014, <https://victoryepes.blogs.upv.es/2014/07/27/perforacion-mediante-jumbos/>.
- [17] Paraszczak, J., Svedlund, E., Fytas, K., y Laflamme, M., “Electrification of loaders and trucks – a step towards more sustainable underground mining,” *Renewable Energy and Power Quality Journal*, pp. 81–86, 2014, doi:[10.24084/repqj12.240](https://doi.org/10.24084/repqj12.240).
- [18] Rafi, M. A. H., Rennie, R., Larsen, J., y Bauman, J., “Investigation of fast charging and battery swapping options for electric haul trucks in underground mines,” en 2020 IEEE Transportation Electrification Conference Expo (ITEC), pp. 1081–1087, 2020, doi:[10.1109/ITEC48692.2020.9161654](https://doi.org/10.1109/ITEC48692.2020.9161654).
- [19] COCHILCO, “Proyección del consumo de electricidad en la minería del cobre 2022-2033,” 2023,
- [20] GIZ, “La energía renovable en la minería,” 2018,
- [21] Komatsu, “Underground hard rock haulage,” 2022, <https://www.komatsu.com/en/products/underground-hard-rock-haulage/>.
- [22] Epiroc, “Battery swap scooptram st14 battery,” 2020, https://www.youtube.com/watch?v=mMNwrPz9st0&ab_channel=EpirocUndergroundMiningandTunneling.
- [23] Epiroc, “Epiroc charges forward with batteries as a service,” 2020, <https://www.epiroc.com/en-kw/newsroom/2020/epiroc-charges-forward-with-batteries-as-a-service>.
- [24] Sandvik, “Sandvik battery swap,” 2022, https://www.youtube.com/watch?v=ZxCP4N2H6ag&ab_channel=Sandvik.
- [25] Mining, C., “The cat® mec500 mobile equipment charger,” 2022, https://www.youtube.com/watch?v=Wq_LqOUTWgo&ab_channel=CatMining.
- [26] SIMIM, “Sandvik pone a prueba su camión eléctrico a batería th665b, considerado el de mayor capacidad para minas subterráneas,” 2022, <https://www.simim.org/simimnoticias/detalle-noticia.php?id=1318>.
- [27] ProQuest, “Sandvik sells ‘first bev fleet in india’,” 2022, <https://www.proquest.com/docview/2670451708?fromopenview=true&pq-origsite=gscholar>.
- [28] Minero, T., “Minera sueca lkab ordena equipos eléctricos de epiroc,” 2021, <https://camiper.com/tiempominero-noticias-en-mineria-para-el-peru-y-el-mundo/minera-sueca-lkab-ordena-equipos-electricos-de-epiroc/>.
- [29] Comercio, E., “Perú posee el primer vehículo eléctrico minero de latinoamérica,” 2019, <https://elcomercio.pe/economia/dia-1/vehiculos-electricos-peru-posee-el-primer-vehiculo-electrico-minero-de-latinoamerica-mineria-noticia/>.
- [30] Larminie, J. y Lowry, J., *Electric Vehicle Technology Explained*. John Wiley & Sons, 2003.

- [31] Rugh, J., Hovland, V., Devices, M., y Andersen, S., “Significant fuel savings and emission reductions by improving vehicle air conditioning,” 2004.
- [32] Fiori, C., Ahn, K., y Rakha, H. A., “Power-based electric vehicle energy consumption model: Model development and validation,” *Applied Energy*, vol. 168, pp. 257–268, 2016, doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.097>.
- [33] Codelco, “Resumen ejecutivo ingenieria de detalles infraestructura y servicios proyecto explotacion diamante,” 2020, https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/docs/20200909/20200909093446/resumen_ejecutivo_ce_001d.pdf.
- [34] de Antofagasta, U., “Acuerdo de producción limpia campus sustentable,” 2018, <https://intranetua.uantof.cl/crea/hcycompromiso.pdf>.
- [35] CNE, “Factor de emisiones gei del sistema eléctrico nacional,” 2023, <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/factor-de-emision-sic-sing/>.