



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



THIAGO ALMEIDA MARTINS PEREIRA PINTO

**CONSEQUÊNCIAS DO USO DE CARREGADEIRAS TIPO LHD
ELÉTRICAS EM MINAS SUBTERRÂNEAS**

OURO PRETO

Fevereiro – 2018

THIAGO ALMEIDA MARTINS PEREIRA PINTO

**CONSEQUÊNCIAS DO USO DE CARREGADEIRAS TIPO LHD
ELÉTRICAS EM MINAS SUBTERRÂNEAS**

Monografia apresentada ao Curso de
Graduação em Engenharia de Minas
da Universidade Federal de Ouro
Preto como requisito para a obtenção
do título de Engenheiro de Minas.

Professor orientador: Dr. José Margarida da Silva

OURO PRETO

Fevereiro – 2018

P659c

Pinto, Thiago Almeida Martins Pereira.

Consequências do uso de carregadeiras tipo LHD elétricas em minas subterrâneas [manuscrito] / Thiago Almeida Martins Pereira Pinto. - 2018.

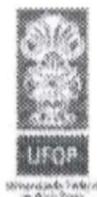
55f.: il.: color; tabs.

Orientador: Prof. Dr. José Margarida da Silva.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas.

1. Minas e mineração. 2. Lavra subterrânea. I. Silva, José Margarida da. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 622.016



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

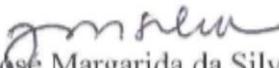
Aos 21 dias do mês de fevereiro de 2018, às 08h00min, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DEMIN/EM, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado “**CONSEQUÊNCIAS DO USO DE CARREGADEIRAS TIPO LHD ELÉTRICAS EM MINAS SUBTERRÂNEAS**”, pelo aluno **Thiago Almeida Martins Pereira Pinto**, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof. Dr. José Margarida da Silva (orientador)**, **Prof. Dr. Hernani Mota de Lima** e **Prof. M.Sc. José Fernando Miranda**.

Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela **APROVAÇÃO** do candidato, com a nota **7,0** concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

O aluno fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após a entrega dos exemplares definitivos (Cd e cópia impressa) da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

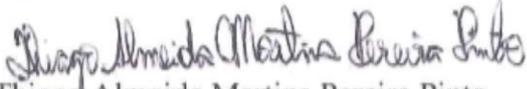
Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pelo discente.

Ouro Preto, 21 de fevereiro de 2018.


Prof. Dr. José Margarida da Silva
Presidente da Comissão Avaliadora e Professor Orientador


Prof. Dr. Hernani Mota de Lima
Membro da Comissão Avaliadora


Prof. M.Sc. José Fernando Miranda
Membro da Comissão Avaliadora


Thiago Almeida Martins Pereira Pinto


Prof. M.Sc. José Fernando Miranda
Professor responsável pela Disciplina Min 491 – Trabalho de Conclusão de Curso

Aos meus pais e demais familiares
dedico mais esta etapa vencida e o apoio.

Aos meus amigos pelo companheirismo
e por todos os momentos.

As repúblicas amigas e aos rocks.

AGRADECIMENTO

Ao meu orientador, José Margarida, pelo incentivo e orientação neste trabalho.

A Escola de Minas pelos ensinamentos e pelas oportunidades.

Aos amigos de Luz e aos que encontrei em Catalão pelo companheirismo de tantos anos.

Aos amigos de Ouro Preto que sempre se fizeram presentes e apoiaram ao longo de toda a graduação.

A vida republicana de Ouro Preto na gloriosa República Notre Dame e aos meus irmãos Quasímodos por todo esse tempo que pudemos aproveitar juntos.

“UT INCEPT FIDELIS SIC PERMANET”

RESUMO

As carregadeiras tipo LHD são presença quase constante em minas subterrâneas desde 1963, sendo que as movidas a energia elétrica não são novidade nessa atividade, mas nos últimos tempos sua tecnologia tem evoluído rapidamente tornando-as cada vez mais atraentes para o setor e para o âmbito subterrâneo. Este trabalho teve como objetivo analisar as consequências da implementação das carregadeiras tipo LHD elétricas em minas subterrâneas, baseado no fato de que a tecnologia de abastecimento energético comumente utilizada neste equipamento é motor a diesel e o mesmo traz diversos desafios ambientais e econômicos ao trabalho em mineração subterrânea. O uso de óleo diesel como combustível em minas subterrâneas acarreta principalmente um ambiente confinado mais quente, um ar poluído com substâncias tóxicas à saúde do ser humano e um maior custo financeiro com a ventilação da mina a fim de amenizar os referidos problemas. As LHDs elétricas possuem dois modelos disponíveis no mercado, uma ligada a cabo no sistema elétrico da mina e outra a bateria, sendo que os dois modelos proporcionam uma quase extinção de problemas de geração de calor excessivo causado por máquinas movidas a diesel e de gases tóxicos. O uso das LHDs elétricas se mostrou vantajoso não só para o bem-estar do trabalhador como também revelou que quando bem dimensionado pode reduzir drasticamente o consumo energético do sistema de ventilação, propiciando uma redução de 33% a 60% nos custos de ventilação. O modelo de cabo se mostrou menos vantajoso em relação ao de bateria devido a sua mobilidade reduzida e manutenção de cabos bastante dispendiosa, tornando as LHDs a bateria uma melhor opção. Concluiu-se que os modelos elétricos desse tipo de carregadeiras têm grande potencial para se tornarem tendência no mercado e que em alguns anos estarão presentes na maioria das minas subterrâneas do mundo.

Palavras-chave: LHD elétrica, LHD a bateria, LHD a cabo, ventilação subterrânea, mina subterrânea.

ABSTRACT

Since 1963 the LHD loaders are constantly present at underground mines and those powered by electric energy aren't a new feature in this activity. However nowadays its technology has been quickly improved which makes them an increasingly attractive to this sector and to the underground sphere. The aim of this work is to analyse the implementation consequences of electric LHD loaders at underground mines based on the fact that the energy supply technology commonly used in this equipment is diesel engine which brings a variety of environmental and economic challenges in underground mines activities. The use of diesel fuel in underground mines leads to an increase of underground heat environment and an increasing air pollution by toxic substances to human beings, so that there is an increased ventilation cost to the mine to reduce these problems. There are two different models of electric LHD available in the mining trade where one connects to the mine electric system by a cable and the other one connects by battery so that both models provide nearly disappearance of heat generation and toxic gas emission by the machines. The use of electric LHD loader showed advantages not just for the employees' wellbeing also revealed that their proper use can severely reduce the energy consume of the ventilation system along with a decrease of the ventilation costs from 33% to 60%. The cable system showed less advantages compared to the battery system due to its reduced mobility and its expensive costs of cable maintenance, which makes the battery LHD loaders a best option. To conclude, these electric loader models has great potential to become a market trend whereby in some years it will be majority in underground mines.

Key-words: Electric LHD, Battery LHD, Cable LHD, underground ventilation, underground mine.

LISTA DE SIMBOLOS

AUSIMM – Australian Institute of Mining and Metallurgy

°C – Graus Celsius

CFEM – Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais

COPEL – Companhia Paranaense de Energia

dB - Decibél

D&B – Drill and Blast

EPA – Environmental Protection Agency

HP – Horse Power

km/h – Quilometro por hora

l/h – Litros por hora

LHD – Load – Haul – Dump

LTO – Lithium Titanate Oxide

m – Metro

m² - Metro quadrado

m³ - Metro Cúbico

µm - Micrometro

kW - quilowatt

PIB – Produto Interno Bruto

MTBF – Mean Time Between Failure

NATM – New Austrian Tunnelling Method

OEM – Original Equipment Manufacturer

t - Tonelada

TMEF – Tempo Médio Entre Falhas

V – Volt

VOD – Ventilation On Demand

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ciclo de Produção – Operações Unitárias.....	4
Figura 2: LHD Operada por Controle Remoto.....	7
Figura 3- LHD Elétrica Scooptram EST1030 com Capacidade de 10 toneladas equipada com cabo de arraste..	19

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produtos Químicos Encontrados pela EPA nas Emissões de Diesel.....	8
Tabela 2 - Comparação de Disponibilidade, Utilização e Manutenção entre LHDs a Diesel e Elétricas a Cabo.	266
Tabela 3 - Comparação de Velocidades Médias entre três tipos de LHDs diferentes.....	27
Tabela 4 - Comparação sobre características de LHDs elétricas e a diesel.....	29

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Considerações Iniciais	1
1.2	Objetivo	3
1.3	Metodologia.....	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Operações Unitárias em Minas Subterrâneas	4
2.1.1	Desmonte de Rochas	4
2.1.2	Manuseio de Materiais.....	5
2.2	Recursos Energéticos de uma Mina.....	7
2.2.1	Óleo diesel	7
2.2.2	Elettricidade.....	8
2.3	Condicionamento de Mina.....	10
2.4	Indicadores de Desempenho	13
2.4.1	Índice de utilização	15
2.4.2	Tempo médio entre falhas	15
2.4.3	Tempo médio de reparos	16
2.4.4	Redução na emissão de CO ₂	16
2.4.5	Eficiência da Produção	16
2.5	Generalidades sobre Carregadeiras LHDs (Load-Haul-Dump)	17
3	DISCUSSÃO	19
4	CONCLUSÕES.....	30
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32
	ANEXOS	37

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A civilização humana sempre dependeu dos recursos naturais para o seu desenvolvimento. Às matérias-primas minerais é atribuída importância fundamental no processo evolutivo da humanidade, sempre associado ao domínio e ao uso de suas propriedades com vistas ao atendimento de suas necessidades (NERY, 2009).

De acordo com VALE (2017), a mineração além de ser uma grande fonte de renda, é também um dos alicerces da economia brasileira. Possui um enorme potencial de riquezas devido ao potencial do solo nacional, tornando a atividade uma das protagonistas entre nossas atividades econômicas. Ela possui grande influência histórica, proporciona equilíbrio econômico nos níveis de crescimento nacionais, grande influência no PIB (Produto Interno Bruto) nacional e também é uma grande geradora de empregos diretos e indiretos.

Uma operação mineira envolve altos custos na manutenção das atividades, como por exemplo, a troca de pneus dos caminhões, gasto com explosivos e consumo de combustíveis. Mesmo com estes gastos que têm valores exorbitantes nos custos mensais de uma mina, a operação ainda pode ser viável e geradora de valor. Segundo SILVA (2009), uma operação mineira pode ser tanto lucrativa ou inviável, tudo dependendo da seleção e da utilização dos equipamentos e, até em outros casos, ocorrer uma operação marginal.

Quando um empreendimento de grande porte, como o mineiro, está em atividade alguns fatores podem alterar a balança entre o custo e o lucro, colocando a mineradora em risco, pois uma simples alta nos impostos ou uma queda no valor de mercado do minério poderia inviabilizar todo o empreendimento. De acordo com a REUTERS (2017), a Vale afirmou que os aumentos nos valores da CFEM (Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais), aprovado pelo Congresso Nacional, aumentam a alíquota do minério de ferro em 75%, comprometendo a manutenção e operação de suas minas de alto custo no Brasil de forma a abalar sua competitividade de mercado.

A cada ano que passa, os custos de energia no setor de mineração se tornam mais proibitivos. Eles incluem o aumento dos custos de diesel combustível, devido à queda dos teores e distâncias de transporte mais longas, a construção de linhas de transmissão de longa distância para se conectar às redes locais, transporte de combustível para locais de alta altitude e instalação de sistemas de ventilação adequados. As alternativas de energia renovável podem

ajudar a resolver esses problemas e domar os custos que fogem do controle (DAVIDSE, 2015, apud DELOITTE, 2015).

Segundo a DELOITTE (2015), os preços globais do diesel vêm subindo de 10% a 15% a cada ano, até o ponto em que 30% dos custos operacionais de mineração são dedicados atualmente para energia. À medida que as minas passam a se situar em locais mais remotos, aumentam os riscos ambientais do transporte de diesel em longas distâncias e terrenos acidentados. A Organização Mundial da Saúde também descobriu recentemente que as emissões de partículas de diesel são cancerígenas, estimulando que as empresas encontrem alternativas mais seguras, como o uso de energias renováveis tais como eólica e solar.

Neste contexto, as mineradoras buscam estudar formas de cada vez mais diminuir os custos de suas operações a fim de maximizar os lucros e em épocas de crise conseguirem se manter em atividade.

De acordo com GERMANI (2002), a produção mineral brasileira é predominantemente a céu aberto comparado à subterrânea. A respeito da mineração subterrânea é dito que poucas operações são mecanizadas; em algumas existe uma produção semimecanizada e seu padrão tecnológico operacional mostra similaridade uma com a outra, com destaque em algum desenvolvimento específico em determinadas mina e suas dificuldades locais.

Como toda grande indústria, a indústria mineral também enfrenta diversas dificuldades rotineiras, o que traz para os projetos e novas tecnologias cada vez mais espaço, a fim de tentar solucionar essas dificuldades e reduzir custos. Em relação ao alto gasto que o uso de óleo diesel traz consigo, alternativas de energias mais limpas vem sendo estudadas e melhoradas para que possam se tornar viáveis economicamente. O uso de carregadeiras elétricas não é uma novidade tecnológica, não sendo largamente implementado, pois depende também da mão-de-obra e da vida útil do empreendimento. Diante disso, com os estudos cada vez mais avançados dos últimos anos nas tecnologias de veículos elétricos, isto vem mudando e começa a ganhar corpo no mundo da mineração, podendo trazer benefícios em saúde e redução de custos dentro das empresas.

Esse trabalho apresenta informações a respeito das LHDs elétricas e a diesel destinados ao trabalho em minas subterrâneas a fim de, por meio de comparação de suas principais características, mostrar as principais vantagens e desvantagens de seu uso no setor.

1.2 Objetivo

O objetivo geral deste trabalho é analisar as vantagens e desvantagens do uso de LHDs elétricas em relação às movidas a diesel em minas subterrâneas.

1.3 Metodologia

Para o desenvolvimento deste trabalho foi feita uma revisão bibliográfica realizada através de consulta em artigos científicos, dissertações, teses, revistas e sites especializados em mineração, sendo a maior parte do conteúdo encontrado na internet.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Operações Unitárias em Minas Subterrâneas

Segundo HARRAZ (2011), durante os estágios de desenvolvimento e exploração mineira, quando materiais naturais são extraídos da terra, algumas operações cíclicas são geralmente empregadas para dar continuidade ao trabalho. Essas operações chamadas de operações unitárias são etapas básicas empregadas para a produção mineral a partir de um depósito mineral.

O ciclo de produção que emprega as operações unitárias normalmente é agrupado em desmonte das rochas e no manuseio de materiais. O desmonte geralmente consiste na perfuração e na detonação de explosivos e o manuseio abrange o carregamento e transporte (transporte horizontal) e às vezes o içamento do material (transporte vertical) (HARRAZ, 2011). A Figura 1 apresenta o ciclo das operações unitárias normalmente empregado no dia-a-dia de uma mina.

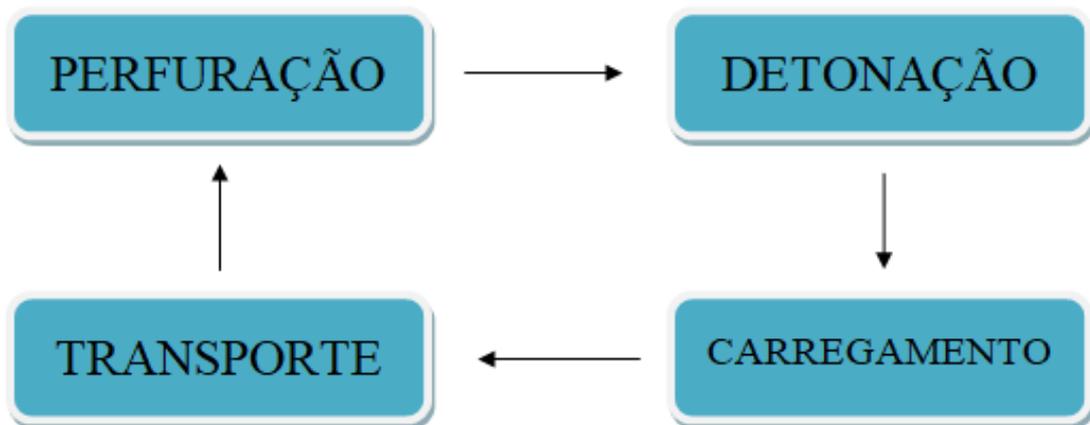


Figura 1: Ciclo das Operações Unitárias (Autor, 2017).

2.1.1 Desmonte de Rochas

Nos dias de hoje, nas escavações dos túneis e galerias em rocha ainda predominam as técnicas da metodologia tradicional, denominada mundialmente como metodologia D&B- Drill and Blast (perfuração e detonação). Na metodologia D&B, a frente a escavar será perfurada com furos normalmente paralelos e com o mesmo comprimento, distribuídos segundo um plano de fogo projetado em função dos condicionantes geológicos do maciço rochoso, do avanço pretendido por detonação, da área e desenho geométrico da seção de escavação. Para a perfuração são utilizados jumbos, montagens especiais com uma ou mais

perfuratrizes, ou perfuratrizes manuais pneumáticas, com avanço automático; estes furos serão carregados com explosivos e detonados em sequência que se inicia do centro (pilão) para a periferia da seção (GERALDI, 2011).

De acordo com GERALDI (2011) túneis e escavações em rochas alteradas (menor resistência comparadas às rochas duras) podem ser escavados mecanicamente com o uso da metodologia NATM (New Austrian Tunnelling Method), descartando quase que completamente o uso de explosivos.

2.1.2 Manuseio de Materiais

Após o material ser desmontado por meio de explosivos ou mecanicamente, os equipamentos de carga são deslocados até as frentes de lavra para que possam ser carregados e em seguida transportarem o material podendo ser minério ou estéril, carregando-os até um determinado ponto de descarga, o qual pode ser a usina de beneficiamento ou aterro de estéril (QUEVEDO, 2009).

Na lavra os custos de operação dos equipamentos de carregamento e transporte representam mais de metade do total do custo da operação. Para controlar os custos, a seleção correta dos equipamentos é vital. Para a definição do tipo de equipamentos e sistemas a serem utilizados para o manuseio de minérios a média ou longa distância, diversos aspectos devem ser considerados e avaliados, entre os quais, *capacidade manuseada, distância de transporte, topografia do terreno, infraestrutura disponível na região, interferências com o meio ambiente e economicidade* (SILVA, 2011). Além disso é necessário saber qual será o tamanho das seções das galerias da mina, a fim de se escolher equipamentos que atendam melhor às essas condições de tamanho. GERMANI (2002) define que escavações de pequeno porte possuem seções de 4 m², de médio porte possuem 9 m² e grande porte 16 m².

Para GERALDI (2011), as operações de limpeza da frente de escavação, carga e transporte estão diretamente relacionadas com a extensão e a seção das galerias a escavar e com a classificação dos maciços.

- Para escavações em maciços rochosos, com condições geomecânicas favoráveis devem ser previstos equipamentos de alta produtividade. Já para escavações em maciços com condições geomecânicas mais adversas, quando os avanços da frente serão mais lentos, estes equipamentos poderão até ser menos produtivos.

- Para galerias com seções de escavação de portes médio a grande, poderão ser utilizados equipamentos rodoviários, como pás carregadeiras de pneus ou mesmo escavadeiras hidráulicas carregando caminhões basculantes no interior das galerias. Dependendo da largura (vão) da seção da galeria, poderá se tornar necessária a escavação de nichos de manobra e carga ao longo da galeria em escavação.
- Para galerias com seções de escavação reduzidas a médias, principalmente em galerias longas, o carregamento na frente de escavação poderá tornar obrigatória a utilização de carregadeiras o produto das escavações até distâncias de 300 a 400 m, são as mais utilizadas na atualidade, carregando caminhões rebaixados especiais ou mesmo vagonetas (composições ferroviárias) em nichos subterrâneos. São também muito utilizadas as escavadeiras de carregamento contínuo, *hagloaders*, que trabalham praticamente estacionadas na frente de serviço, removendo a pilha de rocha detonada e que, por meio de um sistema de transportador de correia e alimentador, integrante do próprio equipamento, vão carregando caminhões ou vagonetas ferroviárias posicionadas logo atrás da escavadeira, junto da frente de escavação. Tanto as LHD como as *hagloaders* podem ser de acionamento diesel ou elétrico.
- São empregados alguns sistemas de transporte para a remoção deste material, até o emboque do túnel:
 - Sistema ferroviário tradicional, com vagonetas de 4 a 6 m³ formando composições tradicionais por locomotivas elétricas ou a diesel, que são conduzidas até um virador de vagões, normalmente posicionado no emboque do túnel.
 - Transportador de correia a longa distância posicionado em uma das laterais da galeria, normalmente projetado para transporte de até 5 km de distância.
 - Poderão ser utilizados também equipamentos rodoviários e, em algumas situações especiais, são utilizadas tubulações ou “minerodutos”.

Os equipamentos usualmente empregados para carregamento em minas subterrâneas são: LHDs; Carregadeiras Bob-Cat; *Overshot Loaders*; *Scrapers* – Rastelos. Já para o transporte de material, os equipamentos normalmente usados são: *Shuttle Cars*; Caminhões; Trens/Vagonetas; Correias Transportadoras e LHDs. A Figura 2 mostra uma típica operação de carregamento de material em frente de lavra subterrânea utilizando uma LHD por controle remoto.



Figura 2: Carregadeira LHD operada por controle remoto (MINING AND CONSTRUCTION, 2013).

2.2 Recursos Energéticos de uma Mina

2.2.1 Óleo diesel

O óleo diesel é um combustível líquido derivado de petróleo, composto por hidrocarbonetos com cadeias de 8 a 16 carbonos e, em menor proporção, nitrogênio, enxofre e oxigênio. É utilizado principalmente nos motores ciclo Diesel (de combustão interna e ignição por compressão) em veículos rodoviários, ferroviários e marítimos e em geradores de energia elétrica (ANP, 2017).

Segundo a PETROBRAS (sem data), os motores diesel, diferente dos motores a álcool ou a gasolina que utilizam de uma mistura de ar e combustível e tem ignição por uma centelha causada pelas velas de ignição, aspiram ar para dentro do cilindro e o mesmo é comprimido pelo pistão, atingindo altas temperaturas, superiores a 500°C, de forma a causar a autoignição do diesel.

GUIMARÃES (2004) afirma que a combustão do óleo diesel não é completa dentro do motor, e por isso a fuligem preta que sai do escapamento dos veículos que o utilizam é formada por gases, vapores e materiais particulados. Os subprodutos dessa combustão incompleta são o Dióxido de Carbono, o Monóxido de Carbono, Óxidos Nítricos, Dióxido de Nitrogênio, Óxidos Sulfurosos, e diversos hidrocarbonetos (etileno, formaldeído, metano, benzeno, fenol, 1,3-butadieno, acroleína e Hidrocarbonetos Aromáticos Polinucleares – HAP's) e, mais de 95% destes materiais particulados possuem tamanho menor que 1 µm, facilitando a inalação e penetração nos pulmões.

Ainda de acordo com GUIMARÃES (2004), a EPA - Environmental Protection Agency (Agência de Proteção Ambiental Americana) publicou durante a década de 90 uma tabela contendo pelo menos 40 produtos químicos constituintes da combustão do diesel e que podem apresentar-se no ambiente subterrâneo. Na TABELA 1 estão relacionados os produtos de maior importância toxicológica provenientes da queima do diesel.

Tabela 1- Produtos químicos encontrados pela EPA nas emissões de diesel.

Acetaldeído	Acroleína	Anilina
Arsênico	Benzeno	Bifenilina
1,3-butadieno	Cádmio	Cianetos
Chumbo inorgânico	Clorobenzeno	Compostos de Antimônio
Compostos de Berílio	Compostos de Cobalto	Compostos de Cromo
Compostos de Manganês	Compostos de Mercúrio	Cresol
Dioxinas e furanos	Estireno	Etilbenzeno
Fenol	Formaldeído	Fósforo
Metanol	Metil Etil Cetona (MEC)	Naftaleno
Níquel	4-nitrodifenila	HAP's diversos
Propionaldeído	Tolueno	Xilenos

Fonte: GUIMARÃES, 2004.

2.2.2 Eletricidade

Eletricidade é o fenômeno físico associado a cargas elétricas estáticas ou em movimento. Seus efeitos se observam em diversos acontecimentos naturais, como nos relâmpagos, que são faíscas elétricas de grande magnitude, geradas a partir de nuvens carregadas. Confirmou-se que a energia elétrica permite explicar grande quantidade de fenômenos físicos e químicos (COPEL, 2016).

A eletricidade é uma forma de energia que pode ser imediata e eficientemente transformada em qualquer outra, tal como em energia térmica, luminosa, mecânica, química etc. Ela pode ser produzida nas mais favoráveis situações como, por exemplo, junto a quedas

de água, nas quais a energia hidráulica está disponível, perto de minas carboníferas ou de refinarias, onde o carvão ou o óleo pode ser utilizado de pronto ou perto dos centros consumidores para onde o combustível pode ser economicamente transportado (HADDAD, 2004).

CAMARGO et al. (2004) confirmam que a energia elétrica é de certa forma uma energia secundária devido a mesma ser gerada a partir de outras fontes energéticas, chamadas primárias, transformadas através de conversores. Atualmente as principais conversões de energia primária em elétrica são a energia térmica contida nos combustíveis fósseis e biomassa através das usinas termelétricas, de energia atômica de minerais radioativos através de centrais nucleares; de potencial hidráulico da água através de usinas hidrelétricas.

Segundo HADDAD (2004), a energia elétrica é passível de transporte, economicamente vantajoso mesmo por grandes distâncias, até localizações nas quais possa ser melhor empregada como regiões populosas, centros industriais ou mesmo núcleos rurais. A energia elétrica é convenientemente empregada devido sua facilidade de aplicabilidade em inúmeros e variados fins como em uso doméstico, público, comercial e industrial.

A energia elétrica é insumo fundamental e estratégico na indústria, sendo o principalmente energético utilizado por 79% das empresas e podendo representar mais de 40% de seus custos de produção. Em vista disso, seu fornecimento com segurança, qualidade adequada e a custos módicos é imprescindível para a garantia da competitividade da indústria nacional (FIRJAN, sem data).

2.2.2.1 Energia Elétrica em Minas Subterrâneas

De acordo com a UNIVERSITY OF WOLLONGONG (sem data), localizada na Austrália, a maioria das minas de carvão australianas possui energia fornecida por outra entidade a uma subestação de superfície no local. A energia é alimentada através de uma aparelhagem para um alimentador principal, e a partir deste distribui para locais necessários em torno da superfície e no subsolo.

A energia elétrica é distribuída ao longo da mina através de suas vias (túneis e galerias) e pode estar exposta a danos. Os cabos são, portanto, "blindados" para minimizar os riscos associados a potenciais danos. O sistema de reticulação subterrânea é seccionado por isoladores e aparelhagem para transformar as potências em tensões operacionais perto do equipamento que será alimentado, na maioria dos casos para 1.100 V, ou 415 V para alguns

equipamentos antigos, 240 V para circuitos especiais como iluminação e 3.300 V para equipamentos de maior capacidade que estão sendo introduzidos. Onde o equipamento elétrico é móvel, como os mineradores contínuos, shuttler cars e cortadores para Longwall, cabos especiais (chamados de cabos de arrasto) são usados para alimentar o equipamento.

Segundo GERALDI (2011), nas minerações subterrâneas é necessário um fornecimento de energia em redes de alta tensão (tensões de 3800 /4000 V), com subestações móveis de rebaixamento acompanhando a(s) frente(s) de escavação, principalmente para a alimentação de jumbos hidráulicos e carregadeiras de acionamento elétrico. Também deverão ser instaladas em subterrâneo subestações fixas para suprir as redes de iluminação, as instalações de bombeamento e de ventilação auxiliar, evitando-se condutores-cabos elétricos especiais de maior diâmetro, de alto custo e difícil manuseio.

Onde o equipamento elétrico é móvel como os mineradores contínuos, shuttler cars e cortadores para Longwall, cabos especiais (chamados de cabos de arrasto) são usados para alimentar o equipamento (UNIVERSITY OF WOLLONGONG, sem data).

Devido ao alto consumo de energia elétrica e para serem evitadas situações emergenciais, principalmente em túneis longos e minerações subterrâneas, mesmo que na região exista disponibilidade de energia elétrica é conveniente a instalação de grupos geradores para atender pelo menos parte do consumo de energia projetado (GERALDI, 2011).

2.3 Condicionamento de Mina

A ventilação em mina subterrânea tem como principal objetivo fornecer um fluxo de ar fresco (limpo), natural ou artificial, a todos os locais de trabalho em subsolo, em quantidades suficientes para manter as condições necessárias de higiene e de segurança dos trabalhadores. Essa operação geralmente usa ventiladores, que consomem energia elétrica.

Uma ventilação inadequada torna as condições ambientais da mina precárias para os operários e equipamentos, representando para a empresa uma perda de produtividade. De uma maneira simplificada, pode-se resumir o papel da ventilação em (VUTUKURI et al., 1986):

- Permitir a manutenção de uma quantidade adequada de oxigênio aos operários;
- Suprimir os gases tóxicos oriundos do desmonte de rochas com explosivos;
- Evitar a formação de misturas explosivas gás-ar;
- Eliminar concentrações de poeiras em suspensão;

- Diluir os gases oriundos da combustão de motores;
- Atenuar a temperatura e a umidade excessiva.

O ar de uma mina é normalmente seco, contendo 20,93% de O₂, 79,04% de N₂ e 0,03% de CO₂, em volume. O total de outros gases soma menos que 0,01%. Além destes gases, a atmosfera subterrânea contém pequenas quantidades de outros gases como metano (CH₄), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), hidrocarbonetos não oxidados e parcialmente oxidados, amônia (NH₃), gás sulfídrico (H₂S) e dióxido de enxofre (SO₂), mesmo sob condições normais (VUTUKURI et al., 1986).

Segundo BRAKE (2009, apud MACHADO, 2011) um dos maiores impactos na ventilação das minas subterrâneas produtoras de metais nos últimos 100 anos foi a introdução de equipamentos a diesel. Esses equipamentos introduziram novos riscos relacionados com os subprodutos de sua combustão em ambientes confinados, os quais podem tornar irreparável a atmosfera no interior das minas ou mesmo danosa à saúde dos trabalhadores (EPA, 2000).

As doenças pulmonares de origem ocupacional são causadas pela inalação de partículas, névoas, vapores ou gases nocivos no ambiente de trabalho. O local exato das vias aéreas ou dos pulmões onde a substância inalada irá se depositar e o tipo de doença pulmonar que irá ocorrer dependerão do tamanho e do tipo das partículas inaladas. As partículas maiores podem ficar retidas nas narinas ou nas grandes vias aéreas, mas as menores atingem os pulmões. São exemplos dessas enfermidades (GANCEV, 2006):

- Silicose;
- Pulmão negro;
- Asbestose;
- Pneumoconiose benigna.

De acordo com GANCEV (2006), uma situação recorrente nas minas subterrâneas é o conforto termocorporal. O conforto térmico pode ser associado diretamente a produtividade, acidentes e problemas como exaustão, desmaio, câimbra, sudamina e perda de sais minerais.

O calor é transferido para o fluxo de ar através de várias fontes. Dentro das minas de rochas mais brandas (potássio, gipso, sal, carvão), a própria corrente de ar é suficiente para remover o calor que é produzido durante os processos de produção. Porém, nas minas de metal canadenses profundas, onde a geração de calor pode tornar-se um problema ambiental dominante, a refrigeração também pode ser necessária a fim de manter as condições para os

trabalhos subterrâneos adequados. As quatro maiores fontes de calor nas minas canadenses são (KOCSIS, 2009):

- Auto compressão;
- Equipamentos da mina;
- Gradiente geotérmico;
- Detonações de produção/desenvolvimento.

Os veículos que operam em todas as minas, transformadores elétricos e ventiladores são todos dispositivos que convertem a potência de entrada, através de efeitos úteis (trabalho), em calor. Quase toda energia consumida por um equipamento de mineração adiciona calor ao fluxo de ar, uma vez que as perdas de energia e a maior parte do trabalho realizado são convertidas direta ou indiretamente através de fricção em calor. Nas minas canadenses, o aumento da mecanização, utilização dos equipamentos e demanda de energia resultaram em tais equipamentos subterrâneos como sendo uma das maiores fontes de calor (KOCSIS, 2009).

Para equipamentos elétricos, o calor total produzido é equivalente à taxa a qual a energia lhe é fornecida. Em comparação, a combustão interna dos motores de equipamentos a diesel tem uma eficiência total de apenas um terço da alcançada pelas unidades elétricas. Por isso, os motores a diesel irão produzir aproximadamente três vezes mais calor que os equipamentos elétricos que realizam o mesmo trabalho. Além disso, aproximadamente um terço do calor gerado pelos motores a diesel surge como calor do radiador e do corpo da máquina, um terço como calor nos gases de escape e o um terço restante como potência útil do eixo, que é também convertido em calor através de processos de fricção (KOCSIS, 2009).

GWYN, citado por JENSEN (2013), afirma que quanto mais profundo o minério e os equipamentos adentram a crosta, menos rentável se torna utilizar maquinário que funciona com tecnologia diesel devido à grande quantidade de infraestrutura de ventilação necessária para manter o ambiente de trabalho seguro. Além disso ele também afirma que vê na remoção do diesel uma grande vantagem, já que aliviaria por completo o problema das emissões dos motores a diesel, além de diminuir o calor e os ruídos gerados pelos mesmos.

A necessidade de economias de energia levou à investigação e à implementação de VOD (ventilação por demanda), que foi aplicada pela primeira vez em projetos de ventilação de túneis na Europa. A ventilação pode representar 35% a 45% do consumo de energia de

uma mina. Unosson, citado por JENSEN (2013) afirma que até 30% dos custos totais de energia de uma mina subterrânea destinam-se a alimentar sistemas de ventilação de larga-escala.

O consumo de energia de uma mina pode estar entre 35% e 50%, traduzindo-se em mais de \$20-30 milhões por ano para RAM JACK (2015) ou 40% a 60% para KOCSIS (2009). Já DE LA VERGNE (2003) afirma que em uma mina subterrânea cerca de um terço dos custos das operações elétricas são devidas a ventilação, já PARASZCZAK et al. (2013) apontam para um custo de até 40%.

2.4 Indicadores de Desempenho

É denominada controle a função administrativa que, mediante a comparação com padrões previamente estabelecidos, procura medir e avaliar o desempenho e o resultado das ações, com finalidade de realimentar os tomadores de decisões, de forma que possam corrigir ou reforçar esse desempenho ou interferir em funções do processo para assegurar que os resultados satisfaçam as metas estabelecidas (OLIVEIRA, 2009).

O controle consiste em ações sequenciais para estabelecer os padrões, medir e avaliar o desempenho, e tomar ações corretivas quando necessário, de forma a se identificar o desempenho para poder fazer uso eficiente dos recursos organizacionais. Deve avaliar, assim, como os recursos são usados, agir corretivamente se preciso, e planejar eficazmente para usar os recursos com mais eficiência no futuro.

Existem três pontos principais no que diz respeito à importância dessa função: o controle é necessário para medir e avaliar o desempenho organizacional, é um processo dinâmico e contínuo, e envolve todas as facetas da organização (SARAIVA et al., 2010).

Segundo OLIVEIRA (2009), a informação é o produto final resultante dos processos de controle e avaliação, sendo necessário um sistema de informações que possibilite constantemente avaliar as metas e estratégias da empresa.

De acordo com DOMANSKI (2014), os indicadores de desempenho são um instrumento de gestão, composto por um ou mais grupos de indicadores que torna possível avaliar de forma contínua tanto a posição quanto a evolução de determinada atividade de uma empresa. PAIVA (2016) relata que se os índices de desempenho forem mapeados sistematicamente, poderão ser o elemento-chave para a medição de resultados, tanto positivos ou negativos, da aplicação de alguma tecnologia ou mesmo da integração de processos.

A possibilidade de quantificação dos impactos dos indicadores de desempenho sobre a produtividade permite uma ordenação das ações e visam corrigir esses desvios e maximizar a produtividade pela eliminação das perdas do processo produtivo (BRANDÃO et al., 2009. apud PAIVA, 2016)

Apesar do foco em lucratividade ser constante, o desempenho é um conceito multidimensional, o que faz com que um único indicador seja incapaz de definir vários aspectos ou prover uma clara perspectiva da missão crítica das organizações (SARAIVA et al., 2010).

Dentre os indicadores de desempenho, alguns possuem maior relevância no quesito carregamento/transporte na mina, que envolve uso de equipamentos, entre eles as LHDs.

O uso dos indicadores de desempenho aplicado nas operações das minas subterrâneas tem o intuito óbvio de determinar pontos dentro das operações que possam ser revistos e melhorados na intenção de se alcançar metas estabelecidas. Alguns indicadores de desempenho, quando bem interpretados, podem levar à melhora do uso dos recursos e ajudar a otimizar processos, sendo exemplo disso o controle de tempos de manutenções a fim de se reduzir tempos ociosos e/ou mal empregados, medição das taxas de disponibilidade e utilização de equipamentos sempre procurando encontrar pistas dos problemas que estejam prejudicando as taxas, ou mesmo índices de emissão de gases com objetivo de melhorar o ambiente de trabalho da mina, bem estar e eficiência do trabalhador. Disponibilidade física de equipamentos

Corresponde à parcela das horas programadas em que o equipamento está apto para operar, isto é, não está à disposição da manutenção (SILVA, 2009).

$$DF = \frac{HP - HO}{HP} \cdot 100\% \quad (1)$$

Onde:

DF = disponibilidade física que representa a percentagem do tempo que o equipamento fica à disposição do órgão operacional para a produção;

HP = corresponde às horas calculadas por ano, na base dos turnos previstos, já levando em conta a disponibilidade mecânica e/ou elétrica;

HO = corresponde às horas de reparos na Oficina ou no Campo, incluindo a falta de peças no estoque ou falta de equipamentos auxiliares.

Além da confiabilidade, disponibilidade depende também de manutenção e suporte de manutenção, que são função de vários outros fatores. Geralmente, reconhece-se que o tempo de inatividade não está limitado ao chamado "tempo de manutenção ativo", ou o tempo durante qual o trabalho real (manutenção corretiva ou preventiva) está sendo conduzida em uma máquina. Este tempo geralmente é estendido para todos os tipos de atrasos e períodos de espera (PARASZCZAK, 2005).

Rendimento: o produto da disponibilidade pela utilização.

2.4.1 Índice de utilização

Fator aplicável sobre as horas disponíveis do equipamento. Corresponde à parcela em que o equipamento está em operação (SILVA, 2009).

$$U = \frac{HT}{HP-HO} \quad (2)$$

Onde:

HT = total de horas trabalhadas;

HP = corresponde às horas calculadas por ano, na base dos turnos previstos, já levando em conta a disponibilidade mecânica e/ou elétrica;

HO = corresponde às horas de reparos na Oficina ou no Campo, incluindo a falta de peças no estoque ou falta de equipamentos auxiliares.

2.4.2 Tempo médio entre falhas

MTBF (*Mean Time Between Failures*) é uma sigla que nos países de língua inglesa significa Tempo Médio entre Falhas. Aqui no Brasil podemos encontrar a sigla em Inglês e a sigla em Português (TMEF), as duas formas são muito comuns embora à primeira seja mais utilizada. MTBF é a média dos tempos existentes entre o fim de uma falha e início de outra (a próxima falha) em equipamentos reparáveis. A forma de cálculo é apresentada por CENTRALSIGMA (2017):

$$MTBF = \frac{TOPT - \text{Tempo de Máquina Parada}}{N} \quad (3)$$

TOPT= Tempo de Operação Total;

Tempo de Máquina Parada = Somatório dos tempos em que a máquina ficou parada devido a uma falha;

N = Número de falhas (somente corretivas).

2.4.3 Tempo médio de reparos

Esse índice aponta a média dos tempos que a equipe de manutenção leva para repor a máquina em condições de operar desde a falha até o reparo ser dado como concluído e a máquina ser aceita em condições para operar (CENTRALSIGMA, 2017).

$$MTTR = \frac{TF}{NF} \quad (4)$$

TF = Total de horas parado ocasionado por falhas;

NF = Número de falhas.

2.4.4 Redução na emissão de CO₂

As emissões na atmosfera têm uma especial importância devido a seus diversos impactos ambientais (contaminação dos solos etc). As quantidades absolutas de substâncias tóxicas emitidas podem usar-se como indicadores básicos. Devido à variedade de emissão na atmosfera, os indicadores deveriam limitar-se nas substâncias mais relevantes. Entre eles se incluem: óxido de nitrogênio, dióxido de carbono, dióxido de enxofre, partículas e compostos orgânicos voláteis (KRAEMER, 2004).

2.4.5 Eficiência da Produção

Segundo WIEBMER e WIDDIFIELD (1997), o que uma máquina é capaz de produzir e o que ela realmente produz são dois números diferentes.

As habilidades dos operadores, nível de treinamento e mesmo a atitude e motivação tem um tremendo impacto na quantidade de trabalho real que uma dada máquina pode realizar. Por outro lado, mesmo com um operador “perfeito” no controle, uma parte aparentemente operacional do equipamento pode apresentar desempenho substancialmente

inferior. Um caminhão carregado que não pode alcançar mais do que 80% de sua velocidade máxima para determinadas condições devido a filtros de ar obstruídos, uma pá carregadeira que leva alguns segundos a mais por ciclo de carregamento devido a problemas com uma bomba hidráulica, ou uma perfuratriz que a taxa de penetração é considerada afetada por uma baixa pressão do ar são exemplos de equipamentos aparentemente “operacionais” que atuam abaixo de suas especificações técnicas do OEM (PARASZCZAK, 2005).

De acordo com CAMPBELL e JARDINE (2001), a eficiência de produção pode ser calculada da seguinte forma:

$$E = \left(\frac{\text{Produção Real}}{(\text{Horas Possíveis de Trabalho} - \text{Standby/Ocioso}) \cdot \text{Capacidade Nominal}} \right) \cdot 100\% \quad (5)$$

E = Eficiência de Produção;

Produção Real = Quantidade Produzida;

Horas Possíveis de Trabalho = Correspondem às horas calculadas por ano, na base dos turnos previstos, já levando em conta a disponibilidade mecânica e/ou elétrica;

Standby/Ocioso = Tempo em que o equipamento permanece em modo de espera/ocioso devido a motivos diversos.

Capacidade Nominal é a capacidade máxima que um equipamento pode operar.

2.5 Generalidades sobre Carregadeiras LHDs (Load-Haul-Dump)

Carregadeira subterrânea como as máquinas de carregamento-transporte-despejo (Load-Haul-Dump – LHD) normalmente são as primeiras máquinas utilizadas nas operações de transporte. As LHDs movem o minério do ponto de carregamento até o local de passagem de minério, ou carregam o minério diretamente para o equipamento de transporte (SALAMA et al., 2014 apud SKAWINA et al., 2015); e ao silo ou ao alimentador de correia transportadora como explica Silva, citado por SANTOMAURO (2017).

Uma LHD é semelhante em aparência a uma pá carregadeira convencional. Embora uma LHD não ofereça altas velocidades de viagem, possui uma capacidade de caçamba 50% maior, um motor ligeiramente menor e, em geral, características de emissão melhores do que uma pá carregadeira. Esta unidade é tão popular que mais de 75% das minas metálicas subterrâneas do mundo as usam para abrir túneis, galerias e câmaras de pequeno e grande porte e *stopes*, conforme TATIYA (2005).

Embora algumas das LHDs menores estejam disponíveis com motores elétricos, a maioria delas têm motores a diesel de potência variando de 78 HP (para modelos pequenos) a 145 HP ou mais. As LHDs estão disponíveis com caçambas de vários tamanhos (i.e. carga útil) variando de 0,8 m³ a 10 m³ com uma carga útil de 1,5 t até cerca de 17 t, mas a tendência geral é de LHDs de 1,53 m³ e 3,83 m³. Na maioria das minas e túneis, as LHDs operam em gradientes entre 10% e 20%, mas operá-las em um gradiente plano melhorará a vida da máquina e reduzirá os custos operacionais. As unidades de maior capacidade e as que percorrem longas distâncias são equipadas com motores a diesel. Estas necessitam de arranjos de ventilação extra e dispositivos de tratamento de gases de exaustão eficientes. Todos os países têm suas leis de segurança (i.e. regulamentos) para operar LHDs, particularmente em relação aos padrões de ventilação (TATIYA, 2005).

De acordo com PATERSON et al. (2012), os veículos elétricos subterrâneos mais comuns são as LHDs devido em parte ao seu número nas frotas e horas de operação. Elas normalmente são movidas a diesel, mas os modelos elétricos vêm se tornando cada vez mais comuns. De acordo com Silva, citado por SANTOMAURO (2017) sua eficiência depende da distância de transporte, sendo mais bem aproveitada quando as distâncias de transporte estejam até entre 250 e 300 m.

3 DISCUSSÃO

Segundo JACOBS et al. (2015), teoricamente as LHDs elétricas podem ser alimentadas por três diferentes métodos: linhas/trilhos de alimentação de teto, cabos de alimentação ou baterias. A Figura 3 apresenta um exemplo de LHD alimentada através de um cabo.



Figura 3- LHD elétrica Scooptram EST1030 com capacidade de 10 toneladas equipada com cabo de arraste (MINING AND CONSTRUCTION, 2013).

Linhas de energia no teto são viáveis para uso em caminhões de transporte, onde as rotas não variam durante um longo período de tempo, mas para LHDs, que requerem um alto grau de manobrabilidade, não são práticas. O uso de um cabo conectado às instalações elétricas da mina é considerada a maneira mais viável de alimentar as LHDs atualmente (JACOBS et al., 2015). Contudo, SANTOMAURO (2017) afirma que as LHDs elétricas movidas a bateria vem ganhando espaço no mercado em relação às convencionais movidas a diesel e as que recebem energia através de cabos. O autor ainda afirma que as LHDs elétricas a bateria quando comparadas as alimentadas por cabos possuem maior liberdade para realizar manobras e deslocamento não limitado pelos cabos. Ribeiro, citado por SANTOMAURO (2017) ressalta que o uso de LHDs a bateria pode reduzir até 80% do consumo de energia em uma mina e ainda que a tecnologia de alimentação com cabos está caindo em desuso devido

as restrições operacionais e de segurança. As baterias oferecem a maior flexibilidade das três opções; no entanto, os veículos com bateria são muito mais pesados e devem ser regularmente recarregados (JACOBS et al., 2015).

A respeito do uso de baterias, GREENHILL e KNIGHTS (2013) apontam que as LHDs elétricas necessitam de 1,5 a 2 toneladas de bateria e que só permitem 2 a 2,5 horas de trabalho. O tempo de recarga é estimado em 2 horas, apresentando uma disponibilidade de aproximadamente 50%. Entretanto, SANTOMAURO (2017) afirma que além das baterias tradicionais de chumbo, existem opções que proporcionam uma duração maior, produzidas com os elementos níquel, sódio ou lítio. O autor também afirma ser possível realizar uma troca de baterias de uma LHD de capacidade de 11 t em menos de 20 min.

No portfólio dos fabricantes, é possível encontrar um leque diversificado de modelos de LHDs, não apenas no que se refere a fontes de energia (diesel, bateria, rede elétrica), mas também a dimensões e capacidades. Considerando apenas as linhas da Sandvik e da Atlas Copco, a oferta já abrange soluções com capacidades de carga que variam entre 1 e 25 t, cujas caçambas podem superar os 10 m³ (SANTOMAURO, 2017). De acordo com MORTON (2017) as LHDs a bateria já foram comprovadas tanto pelos fabricantes quanto pelos acadêmicos, mas ainda depende de receber atenção das mineradoras para conseguir se estabelecer no mercado. Além disso, o autor também informa que até o início de janeiro de 2017 existiam pelo menos três LHDs a bateria no mercado, divergindo no tamanho, potência e na capacidade da caçamba.

PARASZCZAK et al. (2013) aponta que as LHDs elétricas possuem emissão zero de partículas, produzem menos ruídos, vibrações e calor, o que proporciona condições de trabalho melhores. PATERSON et al. (2012) e MILLER (2000) concordam que existe uma vantagem econômica para se considerar as LHDs elétricas, como melhorar os controles de regulação ambiental e potenciais economias na ventilação, no consumo de diesel, consumíveis (como óleo para motor e filtros), e na manutenção.

Ao se julgar o uso de equipamentos elétricos em uma mina subterrânea alguns benefícios em relação aos movidos a diesel podem ser observados em vários aspectos. No quesito custo de aquisição, as LHDs elétricas inegavelmente ainda se apresentam mais caras do que suas contrapartes a diesel, podendo isso ser devido às tecnologias desses equipamentos elétricos (ainda que não seja uma nova tecnologia) serem razoavelmente recentes em relação às a diesel e ainda possuírem uma produção cara. MOORE (2010) afirma que as LHDs elétricas custam cerca de 20% a mais que LHDs a diesel de especificações técnicas

semelhantes. Já PARASZCZAK et al. (2013) colocam um custo relativo de 30% a mais para LHDs elétricas em comparação àquelas a diesel para modelos de caçamba de 1,5 m³, e de 20% a 25% para tamanhos de caçamba maiores.

As LHDs elétricas foram projetadas para ser 20% mais caras para se adquirir e cerca de 17% mais caras para se manter, e ainda, foi descoberto que são em torno de 30% mais baratas de se operar de modo geral. Os outros elementos de custo que servem para compensar esses custos adicionais são os custos de energia e consumíveis. Estes foram respectivamente cerca de 20% e 35% menos dispendiosos do que os valores correspondentes de diesel (JACOBS et al. 2015).

Hoje em dia a maioria das minas utilizam LHDs a diesel, e uma mudança para suas contrapartes elétricas geraria uma despesa muito alta, não só em equipamentos mas também em infraestrutura. Uma troca de frota pode ser considerada quando as LHDs já em operação começarem a se defasar e chegar ao fim da vida útil. Segundo SHAH, citado por MORTON (2017), algumas minas relatam que a vida útil de uma LHD a diesel acaba quando é necessária a revisão do motor devido ao custo de tal, sendo que as LHDs a bateria não possuem esse problema devido a falta deste tipo de motor, além de necessitarem de uma baixa quantidade de manutenção programadas, o que leva a crer que haverá uma mudança na maneira como se estipula a vida útil da máquina.

Em relação a infraestrutura JACOBS et al. (2015) destacam a importância da distribuição de energia para alimentação de equipamentos elétricos, pois um número elevado de LHDs elétricas exigirá uma melhora na infraestrutura já existente, como a adição de linhas de energia subterrânea, subestações, transformadores, tomadas e geradores reservas, e nem sempre esse aumento no número de equipamentos é interessante, em relação ao próprio trânsito na mina, como realçado por Carrasco (2008, apud Silva, 2017), quanto trata da lavra por abatimento em blocos (*block caving*). JACOBS et al. (2015) também sugerem que em uma mina onde a aparelhagem é totalmente elétrica pode-se economizar em infraestrutura para máquinas a diesel, citando tanques de armazenamento de combustíveis, estações de abastecimento e tubulações.

MOUSSET-JONES, citado por MORTON (2017) explica o benefício de não necessitar a instalação de tanques de combustível subterrâneo e do sistema de tubulação para trazer combustível subterrâneo, incrementando que isso reduz o potencial de incêndio nas minas que ocorrem nos tanques de combustível e nos equipamentos a diesel, afirmando ser um problema comum de segurança. Porém MORTON (2017) discute que, mesmo havendo uma troca de equipamentos a diesel para elétricos nas minas existentes, em relação a infraestrutura

existente pouco poderia ser feito no sentido de reduzir custos já que ela já está instalada, mas no desenvolvimento das futuras galerias poderá sim existir um benefício. "Os ventiladores podem ser desacelerados ou parados e a expansão da mina pode ser projetada com menor fluxo de ar ou necessidades de refrigeração do ar, como na chamada ventilação sob demanda. Existem limites para a velocidade do ar nas vias da mina, que são função da quantidade de ar e da área das vias da mina. Portanto, menos ar significa que as vias da mina, como os túneis e os raises, podem ser reduzidos em tamanho, o que economiza muito nos custos de desenvolvimento e pode significar que os ventiladores de reforço subterrâneos não precisam ser instalados" explica MOUSSET-JONES, citado por MORTON (2017).

Por fim, CHADWICK (1992) discute que um dos motivos que tornam a ideia da utilização de equipamentos elétricos em minas subterrâneas mal vista é a de que é obrigatória a aplicação de planos de mina específicos para que haja efetividade na implantação desses equipamentos.

No campo do bem estar e saúde dos trabalhadores de uma mina subterrânea uma troca de equipamentos a diesel por elétricos é extremamente favorável, pois isso irá resultar na diminuição (ou mesmo a extinção) dos escapes das máquinas, o que traz ao ar da mina menos gases e partículas danosas à saúde e ambiente menos quente, tornando o local de trabalho menos hostil.

Além do escape cancerígeno, outro problema de saúde associado aos veículos a diesel é o nível de ruído (HARTMAN et al., 1987). O nível médio de ruído para veículos elétricos é de 85 dB, em comparação com 105 dB para veículos a diesel (MOORE, 2010). De acordo com o MINISTÉRIO DO TRABALHO (2015), o trabalhador exposto a um nível de ruídos de 85 dB e 105 dB pode ser exposto a esses níveis por 8 horas e 30 minutos respectivamente, sendo 30 minutos um período curto para uma jornada de trabalho em uma mina subterrânea, tornando este um nível alto e prejudicial a saúde auditiva do trabalhador (ANEXO I). PARASZCZAK et al. (2013) afirmam que os veículos elétricos além de possuírem emissão zero de partículas, apresentam cerca de um terço da emissão de calor gerada por suas contrapartes movidas a diesel e isso irá reduzir a demanda de ventilação.

A ventilação de uma mina subterrânea é um dos pontos mais críticos na discussão da troca das máquinas a diesel pelas elétricas, já que os custos da ventilação de uma mina operada com máquinas a diesel podem corresponder de 33% a 60% dos custos elétricos, não havendo uma porcentagem exata em consenso entre os pesquisadores. JACOBS et al. (2015) por sua vez estimam que economias provenientes da diminuição da necessidade de ventilação superam significativamente os custos energéticos demandados pelas LHDs elétricas, pois o

sistema de ventilação possui uma alta potência necessitando de milhares de kilowatts para seu funcionamento e as LHDs possuem potência média de 180 kW. Ou seja, mesmo elevando-se o custo energético para suprir a alimentação das LHDs, elas necessitam de relativamente pouca energia para operarem, e a economia advinda da economia de ventilação irá superar vertiginosamente os custos de abastecimento das LHDs, trazendo uma redução de custos significativa para a mina.

Como exemplo, MOUSSET-JONES, citado por MORTON (2017) explica que hoje em dia é usada a premissa que o uso de máquinas elétricas a bateria em minas oferece uma economia em ventilação que justificaria a mudança, e ainda que reduzindo a velocidade da ventilação da mina de 100% para 80% se obtém uma redução de 50% no custo de ventilação, mas resalta que existem muitas variáveis neste processo. O que é reforçado por Costa (2017), que acrescenta as questões do grau geotérmico, presença de gases nocivos, resistência da mina, temperatura exterior, da condutividade e calor produzido por pessoas, entre outros.

De acordo com JACOBS et al. (2015), a configuração da frota de LHDs influencia significativamente nos custos horários totais, com um custo maior para maiores proporções de máquinas a diesel. Deve-se notar que, quando os custos horários das LHDs elétricas diminuem (devido a um maior potencial de economia de ventilação, isso é em termos relativos, levando os custos de ventilação da unidade à diesel como zero), os aumentos no preço da eletricidade ou nos requisitos de ventilação não beneficiam os lucros da empresa de mineração, no entanto, esses casos tornarão as unidades elétricas economicamente mais atraentes em relação às unidades a diesel. Em outras palavras, custos de ventilação mais elevados ainda irão ocorrer com um custo operacional maior para a empresa de mineração, no entanto, o custo relativo das LHDs elétricas em relação às LHDs a diesel diminuirá (JACOBS et al., 2015).

Devido aos dois tipos comuns de LHDs elétricas (a cabo e a bateria), é necessário averiguar características dos dois modelos a fim de se escolher o mais compatível à necessidade. As LHDs a cabo apresentam alguns problemas particulares do modelo, dentre os quais PATERSON et al. (2012) e JACOBS et al. (2015) ressaltam que os cabos de arraste apresentam algumas desvantagens, tais como mobilidade reduzida, versatilidade, desgaste dos cabos de arraste e problemas de realocação dos equipamentos. Ainda de acordo com PATERSON et al. (2012), os cabos de arrasto limitam as operações das LHDs elétricas, o que os torna inadequados para alguns métodos de lavra subterrânea. Métodos como *block caving* e aqueles em que os níveis de extração são de longa duração e centralizados, com *layouts* em

forma de espinha de peixe (offset herringbone), são mais apropriados a esses equipamentos de carga elétricos.

Bernardes, citado por SANTOMAURO (2017) levanta o ponto de que para certos métodos de lavra como *sublevel stoping* e métodos em que o minério da frente de lavra é transportado para locais de descarga fixos e distâncias não superiores a 200 m, as máquinas alimentadas por cabos de energia tem maior conveniência, mas estão enfrentando concorrência das máquinas a bateria. O citado autor também destaca que a Sandvik já possui modelos de LHDs elétricas que dispensam a troca de baterias, já que com a energia adquirida com recarga regenerativa proveniente da frenagem elas conseguem atingir o volume de horas típico da operação diária para o equipamento.

JENSEN (2013) informa que as LHDs elétricas possuem equipadas em si o Sistema de Baixa Tensão, um sistema de gerenciamento dos cabos de arrasto com uso de bobinas as quais mantem cabos de 3 m a 400 m sob controle. Unosson explica para JENSEN (2013) que os cabos de arrasto quando muito tensionados podem acabar danificando as paredes e “esquinas” das galerias da mina e até restringir a mobilidade da máquina, e se o cabo estiver folgado aumenta o risco de o cabo ser atropelado ou ficar preso sob o veículo, tendo em vista o quão caros os cabos são. Unosson também explica que o Sistema de Tensão Baixa coloca os cabos suavemente pelo caminho o qual a máquina percorre, e de acordo com sua velocidade também o recolhe e estende de forma a tentar suavizar danos.

Paraszczak et al. (2014) explicam que devido às limitações de movimentação e disposição dos cabos nas vias, é fundamental que apenas uma LHD deste tipo possa trafegar em cada frente de lavra para que não haja risco de atropelamento dos cabos e consequentemente de danos, paralisando a operação. Outro ponto desfavorável aos modelos a cabo é passividade dessas máquinas quando é necessária a troca delas de frentes de lavra, já que não podem se mover em qualquer ponto da mina.

Segundo JACOBS et al. (2015), fazer o transporte das LHDs a cabo entre as frentes de lavra é um trabalho que demanda tempo e que também é oneroso, sendo uma opção fazer o reboque delas por uma de suas contrapartes movidas a diesel. Isso influencia negativamente suas taxas de utilização e nos custos para a empresa. Ainda segundo os citados autores, os custos e os atrasos causados pela realocação das LHDs elétricas podem ser amenizados em minas onde seu layout favoreça um caminho de transporte que possua certa constância e que dure um longo período de tempo. Essa afirmação (em conjunto com danos sofridos pelos cabos de arrasto e a movimentação restrita dessas LHDs) ajuda a reforçar a ideia dos autores de que alguns métodos de mineração e seus layouts são muito mais vantajosos para a

utilização destas LHDs elétricas. Os modelos a bateria não possuem tantas desvantagens como as a cabo, por exemplo problemas de mobilidade, limitação de distância (causado por limite de cabos) e nem de deslocamento, sendo seus maiores problemas a autonomia da bateria para o turno de trabalho e o planejamento ótimo para os ciclos de recarga, com alguns modelos necessitando de uma troca de baterias para não perder tempo em recargas demoradas.

MOORE (2016) descreve uma nova LHD da Sandvik de carga útil de 6,7 toneladas movida a bateria elétrica lançada em 2016, a LH307B, que possui componentes semelhantes aos usados na LH307 (movida a diesel), utiliza bateria de titanato de lítio (LTO – Lithium Titanate Oxide) que em conjunto com o “quick charge” (carga rápida) presente na estação de carga consegue recarregar em aproximadamente 15 minutos, ou seja uma recarga rápida, provendo uma operação contínua e sem necessidade de realizar troca de baterias entre turnos. Segundo o autor, a LH307B possui um resfriamento líquido que garante uma longa vida útil para a bateria que pode trabalhar em uma grande variedade de temperaturas ambientes, permitindo-a até mesmo cobrir a vida útil da carregadeira. Mais ainda, o autor ainda cita os benefícios financeiros do uso de apenas uma bateria, como a eliminação das baterias sobressalentes e também de uma plataforma de guindaste dedicada à troca das baterias.

Os custos de alimentação (combustível e eletricidade) e de manutenção, além das frequências e tempos das manutenções das LHDs está em uma posição importante numa comparação entre tipos de equipamentos. AUSIMM (1993) aponta um consumo de diesel de 40 l/h para uma LHD de grande porte. O Instituto ainda destaca que, com a variação do tamanho da LHD e suas condições de trabalho, alguns custos com insumos para seu funcionamento também variam. JACOBS et al. (2015) apontam que as LHDs a diesel possuem um maior gasto com lubrificação devido ao fato de que estes equipamentos necessitam de lubrificação para o motor e para a transmissão, o que para modelos elétricos não são necessários, sendo realmente necessário apenas a lubrificação de seus sistemas hidráulicos e eixos.

Portalier, citado por SANTOMAURO (2017) explica que os custos da recarga de uma LHD a bateria chega a 20% do custo de encher um tanque de uma LHD a diesel, além de eliminar custos relacionados a troca de óleos e filtros necessários em motores a diesel. KASABA, citado por MORTON (2017) reforça que as máquinas a bateria possuem além de uma controlabilidade mais precisa, uma menor quantidade de manutenção em relação as a diesel. Porém, controversamente, PARASZCZAK et al. (2013) estimam que os custos de

manutenção das LHDs elétricas são cerca de 20% maiores do que das LHDs a diesel e apontam que a manutenção dos motores elétricos é mais fácil e exigem uma mão-de-obra menos qualificada e ferramentas menos sofisticadas, porém exigem manutenção adicional nos modelos a cabo pois os cabos de arrasto e suas bobinas ficam expostos a danos frequentes e possuem alto custo.

PATERSON et al. (2012) mostram em seu trabalho alguns dados de seis LHDs elétricas a cabo e duas LHDs a diesel, dados esses que foram coletados durante mais de 414 dias na Mina de Northparkes da empresa Rio Tinto. Os dados de disponibilidade, utilização e manutenção, tempo médio entre falhas e tempo médio de reparos são apresentados na Tabela 2. Em relação à manutenção, as LHDs a cabo tiveram menos manutenções programadas e tempo médio de reparo, mas precisaram de mais manutenções não programadas quando comparadas às LHDs a diesel. Uma média do número de incidentes também foi levantada, num total de 1.660 incidentes por LHD elétrica e 1.415 com a diesel, resultando em um tempo de inatividade cerca de 50% maior para as LHDs elétricas, logo uma menor taxa de disponibilidade. Cerca de 20% da manutenção das LHDs a cabo foi causada por problemas nos cabos de arrasto e falhas elétricas, contra 6% das LHDs a diesel.

Tabela 2 - Comparação de Disponibilidade, Utilização e Manutenção entre LHDs a diesel e elétricas a cabo.

Acionamento	Nº de LHDs	Disponibilidade Média (%)	Uso da Disponibilidade Média (%)	Utilização Média (%)	Tempo Médio entre Falhas (h)	Tempo Médio de Reparos (h)
Diesel	2	91,94	66,88	61,46	32,76	184
Elétrico	6	88,29	77,18	68,13	21,95	167

Fonte: PATERSON et al., 2012.

Outras fontes da indústria listaram disponibilidade e uso da disponibilidade de uma LHD à diesel como 72% e 62%, respectivamente (JACOBS et al., 2015). AUSIMM (2002) apresenta dados, supondo que a disponibilidade de uma LHD a diesel seja similar à de uma carregadeira frontal e que a máquina seja nova, uma faixa de disponibilidade adequada entre 84% e 88%. A produtividade está em função do tempo de ciclo, que é, por sua vez, dependente de uma grande quantidade de fatores, incluindo tempos de carga/despejo,

capacidade da caçamba, distância de transporte, velocidade, gradiente da estrada, condições da superfície e layout da mina (JACOBS et al., 2015).

De acordo com PARASZCZAK et al. (2013), os ambientes de trabalho fornecidos pelo uso das LHDs elétricas provêm maior segurança e conforto para o trabalhador, o que pode gerar uma eficiência maior do operador. Os mesmos autores também afirmam que algumas características dos motores elétricos como o torque constante, melhor capacidade de sobrecarga e resposta à carga mais rápida podem aumentar as taxas de produtividade, mas que as LHDs a diesel são de 30% até 50% mais rápidas, gerando tempos de ciclo menores do que o das elétricas, e teoricamente aumentando sua produtividade. A Tabela 3 apresenta as capacidades de caçamba e velocidades médias com grade 0 e 10%, vazias e carregadas de três LHDs distintas, uma a diesel, uma elétrica alimentada por cabo e outra elétrica a bateria, em que todas as informações foram obtidas através dos catálogos dos fabricantes (ANEXOS II, III e IV).

Tabela 3 - Comparação de velocidades médias entre três tipos de LHDs diferentes.

Fonte de Energia		Diesel	Elétricas	
			Cabo	Bateria
Modelo		Sandvik - LH410	Sandvik - LH409E	Atlas Copco - SCOOPTRAM ST7 BATTERY
Capacidade da Caçamba Padrão		4.0 m ³	3.8 m ³	3.1 m ³
Velocidade Média - Grade 0%	Vazia	31,9 km/h	12 km/h	23,1 km/h
	Carregada	31,7 km/h	11,8 km/h	22,2 km/h
Velocidade Média - Grade 10%	Vazia	16,3 km/h	9,3 km/h	10,8 km/h
	Carregada	13,1 km/h	5,5 km/h	8,1 km/h

Fonte: Dados retirados dos catálogos dos fabricantes Sandvik e Atlas Copco, apresentados nos ANEXOS II, III e IV.

Julgando-se condições iguais e ideais de funcionamento, é notável que a velocidade média da LHD a diesel, tanto em grade 0% ou 10%, carregada ou não, e ainda possuindo uma caçamba maior, é bem maior do que a das outras duas movidas a energia elétrica, o que evidencia um tempo de ciclo menor e podendo, em condições normais, obter uma produtividade maior do que as outras. A LHD a cabo possui uma caçamba de tamanho aproximado ao da movida a diesel, mas possui velocidades médias inferiores em todos os

aspectos, o que pode ser causado pelos cuidados especiais para a preservação da integridade do cabo de alimentação ou mesmo pela capacidade de recolhimento e de estendimento da bobina sobre o cabo. De qualquer maneira isto implicaria um tempo de ciclo maior para a LHD a cabo e conseqüentemente uma menor produtividade. A LHD a bateria da Atlas Copco possui velocidades razoáveis mesmo em relação ao modelo a diesel, podendo alcançar tempos de ciclo maiores mas ainda sim tem boa performance, o que a beneficia juntamente com as vantagens do equipamento elétrico, a tornando uma opção mais atraente do que a versão a diesel e a cabo.

Uma típica produtividade de uma LHD pode ser considerada como várias centenas de toneladas por hora. Dependendo do metal, este minério poderia valer centenas ou milhares de dólares por tonelada, então cada carregadeira pode manusear entre dezenas e centenas de milhares de dólares de minério por hora. Isso demonstra como mudanças muito pequenas na disponibilidade ou produtividade podem afetar grandes mudanças nos custos operacionais (JACOBS et al., 2015). Não há consenso entre os acadêmicos sobre as taxas de produção relativa de diesel e carregadeiras elétricas (JACOBS et al., 2015).

Por fim, na Tabela 4 foram colocadas as características citadas das LHDs a diesel e elétricas (a bateria e a cabo) a fim de se obter um quadro comparativo com as principais vantagens e desvantagens de cada uma delas.

Tabela 4- Comparação sobre características de LHDs elétricas e a diesel.

	Diesel	Elétrica	
		Cabo	Bateria
Mobilidade	Mobilidade comum, não possui restrições	Mobilidade reduzida e limitada ao comprimento do cabo, podendo resultar em maiores tempos de ciclo e menor produtividade	Mobilidade comum, não possui restrições
Emissão de partículas	Liberação de partículas tóxicas e cancerígenas ao ser humano	Não liberam partículas	
Ruídos	Alta emissão de ruídos, com média de 105 dB, prejudicial a saúde auditiva do trabalhador	Baixa emissão de ruídos, com média de 85 dB, sendo não prejudicial a saúde auditiva do trabalhador	
Emissão de Calor	Alta emissão de calor ao ambiente da mina	Um terço das emissões provenientes de uma máquina a diesel	
Custos de Ventilação	Representa 30% a 50% dos custos elétricos em uma mina com maioria de máquinas a diesel	Grande redução nos custos (relativos aos custos em minas com maioria de máquinas a diesel), sendo que uma redução de 20% da taxa de vazão de ar pode oferecer 50% de queda nos custos	
Custo de aquisição de uma unidade do equipamento	-	Custo cerca de 20% a 30% a mais que uma LHD a diesel de especificações técnicas semelhantes	
Manutenção	-	Exceto pelo cabo, a manutenção é semelhante à das LHDs a bateria, as a cabo necessitam de uma atenção maior aos cabos de arraste que são caros e correspondem a maioria dos problemas	Custo cerca de 17% a 20% mais caras que de modelos a diesel, não necessitando de mão de obra tão qualificada e ferramentas menos sofisticadas em relação as a diesel
Infraestrutura	Tanques de armazenamento de combustíveis, estações de abastecimento e tubulações	Linhas de energia subterrânea, subestações, transformadores, geradores reservas, tomadas	
Custo do diesel/eletricidade	Altos custos com combustível (com aumento de preços globais subindo entre 10% e 15% ao ano) devido ao alto consumo por hora das máquinas e ao número delas na frota	Custo da energia muito inferior ao do diesel	Custo para recarregar a bateria cerca de 20% do custo de se encher o tanque de uma LHD a diesel
Realocação entre as frentes de lavra	É conduzida facilmente entre as frentes de lavra	Necessita de auxílio externo para a locomoção entre diferentes frentes de lavra, necessitando de uma infraestrutura pré-montada para poder começar a trabalhar	É conduzida facilmente entre as frentes de lavra
Métodos de Lavra	Praticamente presente em todos os métodos	<i>Sublevel Stopping, Block Caving, Panel Caving</i>	Aplicável a praticamente todos os métodos de lavra

4 CONCLUSÕES

Com o desenvolvimento do presente estudo tornou possível concluir a importância das máquinas elétricas, com foco nas LHDs, nas minas subterrâneas de forma a aumentar a segurança e saúde dos trabalhadores e de reduzir custos de produção e, como isso aumentar o lucro.

As LHDs elétricas existem desde os anos 70, mas devido a limitações tecnológicas e de implantação ainda não conseguiram se difundir nas minas. As LHDs a diesel se consolidaram desde sua criação devido aos governos da época não possuírem leis ambientais e de segurança do trabalho tão rígidas quanto hoje, o que tem trazido aos modelos elétricos a oportunidade de se estabelecer definitivamente no mercado.

O benefício no quesito segurança e saúde é inegável, a eliminação dos escapes da queima do diesel oferecem um ambiente de trabalho menos agressivo ao trabalhador, diminuindo drasticamente as chances do desenvolvimento de doenças respiratórias e motoras.

Em termos de alimentação energética da máquina, as carregadeiras elétricas oferecem duas opções viáveis: alimentação a cabo ou a bateria. Ambas oferecem benefícios em custos de manutenção menores que as dos modelos a diesel e necessitam de menos tempo de manutenção, logo possuem uma maior disponibilidade para trabalho maior. Os modelos a cabo apresentam limitações de movimento podendo afetar os tempos de ciclo e consequentemente a taxa de produção, e também necessitam de cuidados extras com seus cabos, pois representam o item mais dispendioso para manutenção. Além disso, a implantação deste tipo de LHD necessita da instalação de uma infraestrutura elétrica bem-disposta na mina, gerando custos de instalação e perda de produção sempre que uma nova frente de lavra é aberta, pois é necessária toda a instalação elétrica completa para que possam operar e necessitam de transporte externo para chegarem à frente de lavra. Os modelos a bateria não possuem os problemas das a cabo, necessitando apenas que seu ciclo de recarga seja bem dimensionado para que não necessitem parar durante um turno de trabalho para tal.

A ventilação é um fator chave na escolha do uso de LHDs elétricas, pois elas não possuem escape, não auxiliando no aquecimento e nem na poluição do ambiente mineiro. Devido a estes dois fatores não é necessária uma potência de ventilação tão alta para a limpeza do ambiente e resfriamento de temperatura, resultando em uma redução nos custos elétricos de ventilação significativos que tornam o investimento em tais equipamentos economicamente viáveis quando feitos com dimensionamento e planejamento adequado.

A tecnologia das LHDs elétricas está avançando rapidamente nos últimos anos e possui potencial para transformar a mineração subterrânea como conhecemos hoje. Além dos estudos para melhoramento da alimentação desses equipamentos, estudos na área de automação também são foco dos fabricantes, a fim de cada vez mais aumentar a produtividade e diminuição de custos operacionais. Em cada caso, considerando o método de lavra, o custo, a vida útil do empreendimento e ainda a possibilidade de automação e a existência do controle da ventilação por demanda, deve ser feita a opção pelo tipo de equipamento mais adequado, produzindo em consequência, índices aceitáveis de produtividade, diluição de minério e custo final, aliados à segurança.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANP-AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Óleo Diesel. 2017. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/petroleo-derivados/155-combustiveis/1857-oleo-diesel>>. Acessado dia 01 de dezembro de 2017.
- AUSIMM-AUSTRALIAN INSTITUTE OF MINING AND METALLURGY. 2012. Cost Estimation Handbook, 2nd ed. Carlton.
- AUSIMM-AUSTRALIAN INSTITUTE OF MINING AND METALLURGY. 1993. Cost Estimation Handbook for the Australian Mining Industry.
- CAMARGO, A. S. G; UGAYA, C. M. L; AGUDELO, L, P, P. Proposta de Definição de Indicadores de Sustentabilidade para Geração de Energia Elétrica. Revista EDUCAÇÃO & TECNOLOGIA Periódico Técnico Científico dos Programas de Pós-Graduação em Tecnologia dos CEFETs-PR/MG/RJ. N° 8, 2004. Disponível em: <<http://revistas.utfpr.edu.br/pb/index.php/revedutec-ct/issue/view/57/showToc>>. Acessado em 05 de dezembro de 2017.
- CAMPBELL. J. D.; JARDINE. A. K. S. Maintenance excellence, New York, Marcel Dekker, 2001.
- CENTRALSIGMA. Indicadores (MTTR e MTBF). Disponível em: <<http://www.centrsigma.com.br/arquivos/marketing/ebook-indicadores-mttr-e-mtbf.pdf>>. Acessado em 04 de janeiro de 2018.
- CHADWICK, J. “Diesel or electric?” Mining Magazine, v. 167, n. 2, pp. 92– 98, Aug. 1992.
- COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA. A Eletricidade, 2016. Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2F0%2F3CD92FA03B2F45E10325740C0047BCD7>>. Acessado em 04 de dezembro de 2017.
- COSTA, L. V. Análise via Simulação da Influência da Temperatura na Produtividade e nos Custos em Virtude do Aprofundamento de Mina Subterrânea. Projeto de Doutorado. PPGEM. 2017.
- DE LA VERGNE, J. Hard Rock Miner’s Handbook, 3rd ed. North Bay, ON, Canada: McIntosh Engineering, 2003.
- DELOITTE. As tendências da mineração – As dez principais questões que as empresas do setor enfrentarão em 2015, 2015. 13 - 14p. DELOITTE. Disponível em <<https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/br/Documents/energy-resources/TendenciasMineracao2015.pdf>>. Acesso em 23 de novembro de 2017.

DOMANSKI, J. C. Indicadores de desempenho e sua importância para a gestão. 2014. Disponível em: <<http://www.administradores.com.br/artigos/negocios/indicadores-de-desempenho-e-sua-importancia-para-a-gestao/81210/>>. Acessado dia 21 de dezembro de 2017.

ENGINEERING AND MINING JOURNAL. Silver Mine Gets Electric LHDs. Edição de abril de 2017. Disponível em: <<http://www.e-mj.com>>. Acessado em 24 de janeiro de 2018.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Health Assessment Document for Diesel Exhaust (Revised External Review Draft). 2000.

FIRJAN. Quanto custa a energia? Disponível em: <<http://www.firjan.com.br/publicacoes/publicacoes-de-economia/quanto-custa-a-energia-eletrica.htm>>. Acessado dia 04 de janeiro de 2018.

GANCEV, B. F. Avaliação de Condições de Qualidade do Ar em Mina Subterrânea. 2006. 1º Simpósio de Projetos Integrados em Engenharia Mecânica – TecMec 2006. Poli/USP. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2006/Artigos/Art_TCC_006_2006.pdf>. Acessado dia 12 de dezembro de 2017.

GERALDI, J. L. P. O ABC das Escavações de Rochas, p. 185-189. Editora Interciência. 2011.

GERMANI, D. J. A mineração no Brasil, 2002. 39p. Disponível em <<https://www.finep.gov.br/images/a-finep/fontes-de-orcamento/fundos-setoriais/ct-mineral/a-mineracao-no-brasil.pdf>>. Acesso em 21 de novembro de 2017.

GREENHILL, N.; KNIGHTS, P. “Conceptual Feasibility of Battery Powered Loaders in Underground Mines,” M.S thesis, Univ. Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile, 2013.

GUIMARÃES, J. R. P. F. Toxicologia das emissões veiculares de diesel: um problema de saúde ocupacional e pública. Revista de Estudos Ambientais, v.6, n.1, jan./abril 2004, p.3-4. Disponível em: <http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/trabalhador/pdf/texto_toxicologia.pdf>. Acessado em 02 de dezembro de 2017.

HADDAD, J. Energia Elétrica: Conceitos, Qualidade e Tarifação – Rio de Janeiro, dezembro/2004. p.9 Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Energ_Elet_Conceitos_Qualid_Tarif_El_etr_Procel-04.pdf>. Acessado em 04 de dezembro de 2017.

HARRAZ, H. Z. Topic 9: Mining Methods Part V- Underground Mining, 2011. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Hassan_Harraz/publication>. Acessado em 28 de novembro de 2017.

- HARTMAN, H.; NOVAK, T.; GREGG, A. "Health hazards of diesel and electric vehicles in an underground coal mine," *Mining Sci. Technol.*, vol. 5, no. 2, pp. 131–151, Jul. 1987.
- JACOBS, W; HODKIEWICZ, M. R; BRÄUNL. A Cost–Benefit Analysis of Electric Loaders to Reduce Diesel Emissions in Underground Hard Rock Mines. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, VOL. 51, NO. 3, MAY/JUNE 2015, pp. 2565-2573
- JENSEN, S. Electric Underground. 2013. Disponível em: <<https://www.oemoffhighway.com/electronics/article/11224086/electrification-of-underground-mining-equipment>>. Acessado em 06 de dezembro de 2017.
- KOCSIS, C. New Ventilation Design Criteria for Underground Metal Mines Based Upon the Life-Cycle Airflow Demand Schedule. 2009. p.ii, p.10-11. Ph.D. Thesis, University of British Columbia, Faculty of Graduate Studies, Department of Mining Engineering, Vancouver, BC, Canada.
- KRAEMER, M. E. P. Indicadore ambientais como sistema de informação contábil. 2004. Disponível em: <<https://www.gestiopolis.com/indicadores-ambientais-como-sistema-de-informacao-contabil/>>. Acessado em 04 de janeiro de 2018.
- MACHADO, H. G. Gestão de Riscos em Minas Subterrâneas – Avaliação da Ventilação de Minas Profundas. 2011. p.3. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto.
- MILLER, A. R. "Fuel-cell mine development and testing," in *Proc. Hydrogen Program Rev.*, 2000, pp. 1–13.
- MINING AND CONSTRUCTION, *Insight on automation*. 2013. Mining and Construction. Disponível em: <www.miningandconstruction.com>. Acessado em 30 de novembro de 2017.
- MINING AND CONSTRUCTION. *Atlas Copco's LHD goes green with electric scooptram est1030*. 2013. Mining and construction. Disponível em: <www.miningandconstruction.com>. Acesso em 12 de janeiro de 2018.
- MINISTÉRIO DO TRABALHO. Normas Regulamentadoras Nº 15 – Atividades e Operações Insalubres. 2015.
- MOORE, P. "Plugging the gap underground," *Mining Mag.*, vol. 201, no. 11, pp. 40–46, Nov. 2010.
- MOORE, P. Underground battery options increase again with new sandvik machines. 2016. Disponível em: <<https://im-mining.com/>>. Acessado em 24 de janeiro de 2018.
- MORTON, J. More battery powered options for LHDs. *Engeneering and Mining Journal*. 2017. Disponível em:<www.e-mj.com>. Acessado em 2 de fevereiro de 2018.

- NERY, M. A. C. Economia Mineral Do Brasil, 2009. 5p. DNPM, disponível em <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/0-sumario-apresentacao-e-introducao>>. Acesso em 20 de novembro de 2017.
- OLIVEIRA, D. P. R. Planejamento estratégico – conceitos, metodologia. São Paulo: Atlas, 2009. 337 p.
- PAIVA, G. Aplicação de tecnologias de informação e automação em minas subterrâneas: desafios e perspectivas. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP, p. 40. 2016.
- PATERSON, W.; KNIGHTS, P. “Management of trailing cables on electrically powered load-haul-dump units,” in Proc. Mining Educ. Australia-Res. Projects Rev., 2012, pp. 67–74.
- PARASZCZAK, J. Understanding and assessment of mining equipment effectiveness. 2005. Institute of Materials, Minerals and Mining and Australasian Institute of Mining and Metallurgy. Published by Maney on behalf of the Institutes. p.A150.
- PARASZCZAK, J.; LAFLAMME, M.; FYTAS, K. “Electric load-haul-dump machines: Real alternative for diesels?” CIM J., vol. 4, no. 1, pp. 13–19, 2013.
- PARASZCZAK, J.; SVEDLUND, E.; FYTAS, K.; LAFLAMME, M. Electrification of Loaders and Trucks – A Step Towards More Sustainable Underground Mining. International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Cordoba, Espanha. 2014.
- PETROBRAS. Óleo Diesel. Disponível em: <<http://www.br.com.br/pc/produtos-e-servicos/para-seu-veiculo/oleo-diesel-veiculo/>>. Acessado em 2 de dezembro de 2017.
- QUEVEDO, J. M. G.; DIALLO, M.; LUSTOSA, L. J. Modelo de simulação para o sistema de carregamento e transporte em mina a céu aberto. Pontifícia Universidade 97 Católica do Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. 2009.
- RAM JACK. How Ventilation on Demand (VOD) Can Reduce Mine Operating Costs. 2015. Disponível em: <<https://ramjack.co.za/mining-resources-articles/ventilation-demand-vod-reduce-operating-costs/>>. Acessado dia 11 de dezembro de 2017.
- REUTERS. Vale diz que alta do royalty de minério de ferro compromete minas de alto custo, 2017. Disponível em: <<https://br.reuters.com/article/topNews/idBRKBN1DN1Q5-OB RTP>>. Acesso dia 24 de novembro de 2017.
- SANTOMAURO, A. Liberdade de movimento. Revista Manutenção e Tecnologia. 2017. Disponível em: <<http://www.revistamt.com.br>>. Acessado em 24 de janeiro de 2018.
- SARAIVA, L. A. S.; CAMILO, M. C. S. Indicadores de Desempenho em uma Empresa Industrial: Concepção, Uso e Análise. Revista FACEF Pesquisa, v.13, n.3. 2010.

SILVA, V. C. Carregamento e transporte de rochas. Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2009.

TATIYA, R. Civil excavation and tunneling – a practical guide. Publicado por Thomas Telford Publishing, p.126. 2005.

UNIVERSITY OF WOLLONGONG. Mine Services – Electric Power. (sem data). Disponível em: <http://undergroundcoal.com.au/fundamentals/16_power.aspx>. Acessado dia 05 de dezembro de 2017.

VALE. Qual a importância da mineração para a economia do país? 2017. Disponível em <<http://www.vale.com/brasil/pt/aboutvale/news/paginas/qual-a-importancia-da-mineracao-para-a-economia-do-pais.aspx>>. Acesso em 21 de novembro de 2017.

VUTUKURI, V. S.; LAMA, R. D. Environmental engineering in mines. New York, Cambridge University Press. 1986. 504 p.

WIEBMER. J.; WIDDIFIELD. L. Cost-per-ton improvement ideas for underground equipment, paper no. 97-169, SME Annu. Meeting, Denver, CO, USA, February 1997.

ANEXOS

**ANEXO I - NR 15 – ATIVIDADES E OPERAÇÕES INSALUBRES - ANEXO Nº1 -
LIMITES DE TOLERÂNCIA PARA RUÍDO CONTÍNUO OU INTERMITENTE**

Nível de Ruído dB	Máxima Exposição Diária Permissível
85	8 horas
86	7 horas
87	6 horas
88	5 horas
89	4 horas e 30 minutos
90	4 horas
91	3 hora e 30 minutos
92	3 horas
93	2 horas e 40 minutos
94	2 horas e 15 minutos
95	2 horas
96	1 hora e 45 minutos
98	1 hora e 15 minutos
100	1 hora
102	45 minutos
104	35 minutos
105	30 minutos
106	25 minutos
108	20 minutos
110	15 minutos
112	10 minutos
114	8 minutos
115	7 minutos

ANEXO II – Especificações Técnicas da LHD LH410 a diesel da Sandvik

SANDVIK LH410 MASS MINING LOADERS

TECHNICAL SPECIFICATION

Sandvik LH410 represents state of the art performance in difficult applications, enhanced operator ergonomics and several built-in safety features. High breakout forces, compact and lightweight unique design together with reliable structure ensures economical and reliable productivity. LH410 features a high lift boom enabling fast and accurate three-pass loading into the Sandvik TH430 truck.



CAPACITIES

Tramming capacity	10 000 kg
Break out force, lift	20 390 kg
Break out force, tilt	19 340 kg
Tipping load	23 400 kg
Standard bucket	4.0 m ³

SPEEDS FORWARD & REVERSE (LEVEL/LOADED)

1st gear	5.5 km/h
2nd gear	10.2 km/h
3rd gear	17.5 km/h
4th gear	31.7 km/h

BUCKET MOTION TIMES

Raising time	6.7 sec
Lowering time	4.3 sec
Dumping time	2.7 sec

OPERATING WEIGHTS

Total operating weight	28 500 kg
Front axle	12 850 kg
Rear axle	15 650 kg

LOADED WEIGHTS

Total loaded weight	38 500 kg
Front axle	28 250 kg
Rear axle	10 250 kg

OTHER OPTIONS

Additional cabin heater element for air conditioning
Cover grills for lamps
Mesabi copper radiator with changeable tubes for Volvo Penta TAD1140VE engine
Converter with lock-up, for Mercedes-Benz OM926LA engine
Spare rim 13.00-25/2.5 (for tyres 18.00 R25)
Boom suspension (ride control)
Aggressive water package
Electrical filling pump for hydraulic oil
Wiggins quick filling set for fuel and oils (hydraulic, engine and transmission)
Integrated weighing system
Electric loader towing kit
Accordance with CE-norms (CEN)

GRADE PERFORMANCE

Volvo TAD1140VE

Empty

Percent grade	0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.5	14.3	17.0
Ratio					1:12	1:10	1:8	1:7	
1st gear (km/h)	5.5	5.5	5.5	5.5	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4
2nd gear (km/h)	10.2	10.2	10.1	10.0	10.0	9.9	9.9	9.8	9.8
3rd gear (km/h)	17.6	17.4	17.3	17.1	16.9	16.3	14.2	13.1	9.5
4th gear (km/h)	31.9	31.3	30.8	25.7	21.6				

Loaded

Percent grade	0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.5	14.3	17.0
Ratio					1:12	1:10	1:8	1:7	
1st gear (km/h)	5.5	5.5	5.5	5.4	5.4	5.4	5.4	5.3	5.3
2nd gear (km/h)	10.2	10.1	10.0	10.0	9.9	9.8	9.7	9.1	8.1
3rd gear (km/h)	17.5	17.3	17.1	16.9	15.0	13.1			
4th gear (km/h)	31.7	30.9	25.5						

ANEXO III – Especificações Técnicas da LHD LH409E elétrica a cabo da Sandvik

SANDVIK LH409E MASS MINING LOADERS

TECHNICAL SPECIFICATION

Sandvik LH409E is a 9.6 tonnes electric Load-Haul-Dump (LHD) developed specially for underground use. It emits very low noise and no exhaust fumes, thus ensuring a better working environment and reduced mine ventilation costs.



CAPACITIES

Tramming capacity	9 600 kg
Break out force, lift	20 400 kg
Break out force, tilt	19 300 kg
Tipping load	24 800 kg
Standard bucket	3.8 m ³

SPEEDS FORWARD & REVERSE (LEVEL/LOADED)

1st gear	3.5 km/h
2nd gear	6.3 km/h
3rd gear	11.8 km/h

BUCKET MOTION TIMES

Raising time	8.0 sec
Lowering time	4.5 sec
Dumping time	3.0 sec

OPERATING WEIGHTS

Total operating weight	24 500 kg
Front axle	9 800 kg
Rear axle	14 700 kg

LOADED WEIGHTS

Total loaded weight	34 100 kg
Front axle	24 100 kg
Rear axle	10 000 kg

GRADE PERFORMANCE

VEM 110 kW

Empty

Percent grade	0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.5	14.3	17.0
Ratio					1:12	1:10	1:8	1:7	
1st gear (km/h)	3.5	3.5	3.4	3.4	3.4	3.3	3.3	3.3	3.2
2nd gear (km/h)	6.4	6.2	6.1	6.0	5.9	5.8	5.7	5.6	5.3
3rd gear (km/h)	12.0	11.6	11.2	10.8	10.1	9.3	8.1	6.5	

Loaded

Percent grade	0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.5	14.3	17.0
Ratio					1:12	1:10	1:8	1:7	
1st gear (km/h)	3.5	3.4	3.4	3.3	3.3	3.3	3.2	3.2	3.1
2nd gear (km/h)	6.3	6.2	6.0	5.9	5.7	5.5	5.2	5.9	4.4
3rd gear (km/h)	11.8	11.3	10.7	9.6	8.4				

ANEXO IV – Especificações Técnicas da LHD Scooptramp ST7 Battery elétrica a bateria da Atlas Copco

BUCKET DATA															
STANDARD											EOD				
		3.8		3.4		3.1		2.8		2.6		2.4		2.3	
Volume, nominal heaped (m ³)		3.8		3.4		3.1		2.8		2.6		2.4		2.3	
Maximum material density (t/m ³)		1.8		2.0		2.2		2.4		2.6		2.8		3.0	
Width, bucket (mm)		W	2 280	2 280	2 280	2 280	2 280	2 280	2 280	2 280	2 280	2 280	2 280	2 280	2 280
Tramming position: Axle centreline to bucket lip (mm)		T1	2 970	2 900	2 800	2 770	2 650	2 670	2 600	3 020	2 970	2 920	2 870	2 830	2 780
Tramming position: Ground to bucket tip (mm)		T2	1 540	1 450	1 400	1 330	1 200	1 230	1 190	1 650	1 580	1 530	1 480	1 430	1 370
Reach (mm)		L1	2 380	2 280	2 220	2 160	2 010	2 050	2 000	2 500	2 420	2 370	2 310	2 270	2 200
Raised position: max height (mm)		H1	4 760	4 660	4 570	4 540	4 540	4 500	4 490	4 650	4 600	4 530	4 510	4 490	4 490
Raised position: bucket tip, height (mm)		H2	1 750	1 850	1 890	1 940	2 050	2 020	2 070	1 700	1 740	1 800	1 840	1 880	1 940

TECHNICAL SPECIFICATIONS

GRADE PERFORMANCE

Standard configuration, empty bucket													
%	Grade	0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.5	14.3	16.0	18.0	20.0	25.0
Ratio	Grade	-	-	-	-	-	1:10	1:8	1:7	-	-	1:5	1:4
km/h	1st gear	4.5	4.4	4.3	4.3	4.2	4.2	4.1	4.1	4.0	4.0	3.9	3.8
	2nd gear	7.4	7.3	7.1	7.0	6.8	6.7	6.5	6.3	6.1	5.4	5.7	5.2
	3rd gear	14.3	13.7	13.1	12.4	11.6	10.8	9.6	8.3	7.1	-	-	-
	4th gear	23.1	21.4	19.1	16.5	12.7	-	-	-	-	-	-	-

3% rolling resistance assumed. Actual performance may vary depending on the application.

GRADE PERFORMANCE

Standard configuration, loaded bucket													
%	Grade	0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.5	14.3	16.0	18.0	20.0	25.0
Ratio	Grade	-	-	-	-	-	1:10	1:8	1:7	-	-	1:5	1:4
km/h	1st gear	4.4	4.4	4.3	4.2	4.1	4.1	4.0	3.9	3.8	3.8	3.7	3.4
	2nd gear	7.3	7.1	6.9	6.7	6.5	6.3	5.9	5.6	5.4	5.1	4.7	3.5
	3rd gear	14.0	13.2	12.2	11.1	9.8	8.1	-	-	-	-	-	-
	4th gear	22.2	19.3	15.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-

3% rolling resistance assumed. Actual performance may vary depending on the application.