

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS

Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais

MONOGRAFIA

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO NA DEMANDA DE VENTILAÇÃO EM MINA
SUBTERRÂNEA COM A ADOÇÃO DE FROTA ELÉTRICA**

Aluno: Alisson Gustavo Santos Mayrink

Orientador: Prof. Michel Melo Oliveira

Junho 2019

RESUMO

O desenvolvimento de equipamentos elétricos intensificou-se na última década com o amadurecimento da tecnologia de baterias. Na mineração, a recente aplicação desta tecnologia aos equipamentos de grande porte (LHD, caminhões) viabilizou sua aplicação em escala produtiva em minas com conceito “livre de diesel” / “totalmente elétrica” no Canadá. Além de eliminar a exposição de trabalhadores aos particulados diesel, estima-se que a total eletrificação em mineração subterrânea apresente um potencial de redução de aproximadamente 40% na demanda por ventilação em função da zero emissão de gases e da menor emissão de calor dos veículos elétricos. Entretanto, estudos técnicos e de aplicação são escassos na literatura. Embora atraente do ponto de vista ambiental, financeiro e de saúde ocupacional; observa-se que a persistência de uma legislação aplicada à ventilação com parâmetros mínimos baseados na tecnologia a diesel apresenta-se como um forte obstáculo para a expansão do conceito elétrico em todo mundo. Neste contexto, este trabalho busca analisar o atual status da tecnologia elétrica em equipamentos para mineração e estruturar uma abordagem prática para quantificar qual o potencial impacto sobre sistemas de ventilação com a adoção de uma mineração subterrânea 100% elétrica. Demonstra-se ainda a possibilidade de revisão da legislação de ventilação com base em veículos elétricos, sem prejuízos a segurança operacional.

Palavras chave: *Ventilação de Mina, Equipamentos elétricos, Mina elétrica, Diesel, Emissão de calor.*

ABSTRACT

The development of electrical vehicles (EV's) has been growing in the last decade due the reliability increase of batteries. The recent usage of this technology at huge mining equipments (LHD, haul trucks) enable its application in productive scale at diesel-free / all-electric conceptual mine sites in Canada. Besides removing workers from diesel particulates exposure, it is expected that total electrification of underground mines could reduce ventilation demand in 40%. This could be achieved due the zero gas emission and the lower heat emission from electrical vehicles. However, technical studies and application cases in literature are limited and privately owned. Although the environmental, financial and occupational health attractiveness, the outdated regulations for minimum ventilation requirements applied to diesel technology it is noticed as barrier for the global expansion of electrical mines. In this context, this paper aims to analyze the actual status of electrical mining equipments and structure a practical approach to quantify the potential benefits in ventilation system due the implementation of a 100% electrical underground mine. Furthermore, it is discussed the update feasibility of mining ventilation regulations without prejudice the operational safety in underground.

Key Words: *Mining Ventilation, Electrical vehicles, All-Electric Mine, Diesel-free, Heat emission.*

Lista de Figuras

Figura 3.1: Fatores de risco e controles por ventilação – (McPHERSON, 1993).....	3
Figura 3.2: Ilustração sobre sistemas de ventilação em subterrâneo (McPHERSON, 1993).....	6
Figura 3.3: Esquema simplificado de sistema de ventilação (McPHERSON, 1993).....	9
Figura 3.4: Posição do ventilador principal em sistemas de ventilação (McPHERSON, 1993).....	10
Figura 3.5: Regulador em mina subterrânea (KASHNIKOV, 2016)	11
Figura 3.6 - Esquema de portões em mina subterrânea (KASHNIKOV, 2016)	11
Figura 3.7 - Barreira instalada em mina subterrânea (KASHNIKOV, 2016)	12
Figura 3.8 - Influência da temperatura no trabalho (McPHERSON, 1993)	16
Figura 3.9 - Decomposição das fontes de calor em minas subterrâneas - (VARASCHIN, 2016) 17	
Figura 4.1: Linha <i>battery-electric</i> da fabricante Artisan / Sandvik - (Artisan Website).....	26
Figura 6.1: Comportamento do tempo de limpeza (<i>clearance</i>) em múltiplos de uma vazão (Q), fator de diluição (fd) e área da galeria (A) – (VARASCHIN, 2016)	36
Figura 7.1: Ventilação da Mina X (Adução: azul / Exaustão: vermelho).....	38
Figura 7.2: Layout da ventilação nas frentes de lavra da Mina X – (MACHADO, 2011).....	39

Lista de Tabelas e Anexos

Tabela 3.1 - Principais gases presentes em ambiente subterrâneo (LE ROUX, 1990)	13
Tabela 3.2 - Limites de tolerância e efeitos de gases (Le Roux, 1990).....	14
Tabela 3.3 - Regimes de trabalho e exposição ao calor NR-15.....	16
Tabela 3.4: Legislações mundiais sobre demanda por ventilação para equipamentos a diesel (Stinnette, 2013).....	20
Tabela 3.5: Demanda por ventilação para equipamentos à diesel do programa TIER.....	21
Tabela 4.1: Cronologia da aplicação de diesel em minas subterrâneas – (Stinnette, 2013).....	23
Tabela 6.1: Comparação entre métodos para cálculo da demanda de ventilação requerida para LHD Sandvik LH517 de 285 Kw – (STINNETTE, 2013).....	35
Tabela 7.1: Dados gerais sobre escala de produção Mina X.....	37
Tabela 7.2: Capacidade nominal dos sistemas de ventilação da Mina X.....	39
Tabela 7.3: Listagem de equipamentos e da potência instalada na Mina X.....	40
Tabela 7.4: Distribuição da vazão de ar primária da Mina X.....	41
Tabela 7.5: Comparativo de cenários da Mina X com adoção de frota elétrica.....	43
Anexo 1 - Principais equipamentos elétricos disponíveis no mercado 2019	50
Anexo 2 - Comparativo da tecnologia de equipamentos elétricos para mineração.....	51

Lista de Símbolos, Nomenclaturas e Abreviações

ABB	Asea Brown Boveri Ltd
ANFO	Ammonium Nitrate Fuel Oil
BEV's	Battery Electric Vehicles
CAPEX	Capital Expenditure
CEO	Chief Executive Officer
CFM	Pés cúbicos por minuto
DPM	Diesel Particulate Matter
EPA	Environmental Protection Agency - USA
EV	Electrical Vehicles
FIRJAN	Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro
GHG	Greenhouse Gases
IARC	International Agency for Research on Cancer
LHD	Load Haul Dump
LOM	Life of Mine
MSHA	Mining Safety and Health Agency - USA
MTE	Ministério do Trabalho e Emprego
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health - USA
NPV	Natural Pressure Ventilation
NR	Norma Regulamentadora
NRM	Normas Reguladoras de Mineração
OPEX	Operational Expenditure
Oz	Onça Troy
TPA	Tonnes per Year
TPD	Tonnes per Day
VL's	Veículos Leves

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	OBJETIVOS	2
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1.	A ventilação em mina subterrânea	3
3.1.1.	Ambiente subterrâneo e fatores de risco	3
3.1.2.	Objetivos da ventilação	4
3.1.3.	Breve histórico	5
3.1.4.	Sistemas de ventilação	7
3.1.4.1.	Ventilação Natural.....	7
3.1.4.2.	Ventilação Mecânica	8
3.2.	Fatores que alteram a qualidade do ar subterrâneo	12
3.2.1.	Gases	12
3.2.2.	Particulados.....	15
3.2.3.	Calor e temperatura	15
3.3.	Demanda de ar e legislação em vigor	18
4.	EQUIPAMENTOS EM FROTA SUBTERRÂNEA	23
4.1.	Frota tradicional e diesel como fonte motriz.....	23
4.2.	Tecnologia disponível para eletrificação de equipamentos.....	25
5.	APLICAÇÕES DE FROTA ELÉTRICA NA MINERAÇÃO SUBTERRÂNEA.....	27
5.1.	Histórico e literatura técnica.....	27
5.2.	Aplicações recentes e motivações	30
6.	METODOLOGIA PARA MODELAGEM DE FROTA ELÉTRICA.....	32
6.1.	Eficiência energética e emissão de calor.....	32
6.2.	Demanda de ar no cenário elétrico.....	34
7.	ESTUDO DE CASO – IMPLEMENTAÇÃO DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E INFLUÊNCIA NO SISTEMA DE VNETILAÇÃO	37
8.	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES	44
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
10.	ANEXOS	50

1. INTRODUÇÃO

A ventilação é atividade vital para as atividades de mineração em condições subterrâneas. Através da criação de um fluxo de ar ordenado, busca-se adequar a concentração de gases, de particulados e temperatura em condições satisfatórias e seguras para a operação de equipamentos e para a presença humana.

Na literatura é comum observar notas sobre o expressivo consumo energético da ventilação, chegando a responder por cerca de 40% da energia empregada na cadeia de valor mineral. Portanto, iniciativas que busquem oportunidades de otimização de sistemas de ventilação são de grande interesse industrial, do ponto de vista financeiro e também ambiental.

Neste contexto, tecnologias de controle e automação do tipo VOD (Ventilação sob demanda) se popularizaram entre as mineradoras subterrâneas na última década, resultando em expressivas economias. Entretanto, esta tecnologia não soluciona por completo dois aspectos que a mineração subterrânea tende a enfrentar nas próximas décadas.

O primeiro desafio refere-se às legislações cada vez mais rígidas quanto à exposição de trabalhadores aos particulados de diesel (DPM, com potencial cancerígeno). O segundo desafio advém do aprofundamento das minas (em função da exaustão de reservas rasas, ou da maximização de reservas de uma mina já existente), que resulta na invariável necessidade de resfriamento intensivo para atender temperaturas a níveis de conforto de trabalho.

A próxima fronteira tecnológica que pode ser apontada como potencial solução para estes desafios é a adoção de frota 100% elétrica em subterrâneo, conceito *diesel-free*. Uma eletrificação total dos equipamentos implicará em zero emissão de gases e DPM, além de uma redução na emissão de calor quando comparado ao cenário de equipamentos a diesel, o que poderá resultar em uma demanda por ventilação menor. Entretanto, a legislação para ventilação subterrânea ainda permanece inflexível e atrelada a parâmetros diesel.

A maturação da tecnologia de baterias elétricas e preocupações quanto ao preço do diesel já permitem a operação de iniciativas isoladas de minas subterrâneas *diesel-free*. Entretanto, informações sobre estes equipamentos e estudos técnicos de seu impacto na ventilação são escassos e difíceis de serem encontrados em domínio público, especialmente no Brasil.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal analisar o potencial impacto positivo da eletrificação de equipamentos na mineração subterrânea, com enfoque no sistema de ventilação. Para tanto, buscar-se-á esclarecer e discutir os seguintes aspectos:

- Avaliar a tecnologia de equipamentos elétricos para mineração frente à frota tradicional diesel;
- Estabelecer uma metodologia para dimensionar o potencial de redução na demanda de ventilação com a adoção do conceito de uma mina totalmente elétrica;
- Avaliar a viabilidade de implementação de uma mina com frota totalmente elétrica no cenário brasileiro (legislação, financeiro, operacional).

O princípio básico da ventilação subterrânea é regular as condições atmosféricas através do controle do fluxo de ar. Utilizando-se ventiladores principais (*main fans*) e/ou auxiliares (*boosters*) – eventualmente em conjunto com portões de ventilação, paredes e reguladores de fluxo – busca-se fazer o ar circular ordenadamente em subterrâneo por diferença de pressão, ou seja, pela exaustão de ar viciado e injeção de ar renovado.

3.1.2. Objetivos da ventilação

McPherson (1993) sustenta que o objetivo básico de um sistema de ventilação subterrânea é claro e simples: promover correntes de ar em quantidade e qualidade suficientes para diluir contaminantes a concentrações seguras em todas as regiões das instalações onde há pessoas trabalhando ou transitando. Este princípio norteia a maioria das legislações a respeito da ventilação, sendo que a *quantidade* e *qualidade* variam conforme a percepção de risco e de saúde em cada país.

Embora não explicitamente abordado na definição acima, ressalta-se a importância da ventilação nas trocas de calor, seja como meio de dissipar o calor produzindo pela operação dos equipamentos nas frentes de lavra, ou como método de injetar ar refrigerado para propiciar temperatura em condições de trabalho.

Motivado pela escassez mineral e maximização de exploração dos recursos existentes, o segundo caso vem ganhando notoriedade com o aprofundamento das minas, pois em função do gradiente geotérmico, quanto maior a profundidade, maior a temperatura. Já o primeiro caso é um dos fatores-chaves no dimensionamento de circuitos de ventilação e é apontado em muitos estudos recentes (KERAI e HALIM, 2013; VARASCHIN, 2016) como uma fonte potencial de redução de custos e de redimensionamento de sistemas de ventilação com o advento em futuro próximo de equipamento elétricos na operação.

De uma forma mais completa, pode-se dizer que, na mineração, a ventilação subterrânea promove um fluxo de ar ordenado com os objetivos de garantir aos trabalhadores e equipamentos condições de trabalho seguras e confortáveis, atendendo requisitos de:

- Qualidade e quantidade de ar → concentração de gases, particulados;
- Condições térmicas de trabalho → troca de calor, temperatura.

3.1.3. Breve histórico

Em uma perspectiva histórica na obra de McPherson (1993) observa-se que a prática da ventilação subterrânea estivera presente desde relatos em 4000 a.C. quando povos europeus queimavam mato nas frentes de lavra para enfraquecer a rocha. Embora aparentemente eles desconhecessem o potencial do fogo como produtor de correntes de ar induzidas, esta prática foi redescoberta e utilizada intencionalmente mais tarde por Gregos e Romanos no período Medieval e na Revolução Industrial.

Registros de 600 a.C. em mina de prata na Grécia exibem *layout* (sistema de *shafts* com galerias de circulação de ar) que indicam a consciência da importância de circuito de ventilação subterrâneo. Minas romanas apresentavam sistema de *shaft* duplo, e há relatos de escravos utilizando folhas de palmeiras para abanar o interior das minas.

Somente a partir de 1500 d.C que relatos mais detalhados permitiram reconhecer efetivamente a prática de ventilação. Na obra *De Re Metallica* de 1556, Georgius Agricola descreve e ilustra explicitamente métodos de ventilação primitivos: injeção de ar intencional na entrada de *shafts*, ventiladores centrífugos de madeira impulsionados por homens e animais, foles como método de ventilação auxiliar e portões de ventilação. Na Figura 3.2 pode-se verificar uma ilustração sobre ventilação na obra supracitada.

Entretanto, foi o advento da Revolução Industrial na Inglaterra no século XVIII, com a alta demanda na mineração de carvão, que propiciou o estudo e desenvolvimento da ventilação de forma mais científica. Nesta época registrava-se uma série de acidentes e mortes relacionados aos gases tóxicos e explosões constantes.

O primeiro trabalho científico foi elaborado na Inglaterra por J.J. Atkinson em 1854, intitulado *On the Theory of the Ventilation of Mines*. Em sua obra, o autor propõe os princípios em que se baseiam até hoje muitos sistemas de ventilação.

O trabalho de Atkinson, com sólido fundamento matemático, e o desenvolvimento de ventiladores axiais foram extensamente importantes durante todo o século XIX no desenvolvimento de ventilação. Entretanto, a compreensão efetiva do comportamento

termodinâmico do ar somente avançou com os estudos de F.B. Hinsley nas décadas de 1940 e 1950, incluindo análise computacional.

Este último fato foi o que serviu como guia para o desenvolvimento dos softwares de ventilação e que facilitou o planejamento desta atividade na mineração nas modalidades que são feitas até os dias atuais.



Figura 3.2: Ilustração sobre sistemas de ventilação em subterrâneo (McPHERSON, 1993)

3.1.4. Sistemas de ventilação

A unicidade das escavações subterrâneas – geometria, extensão, propriedades do material rochoso, condições atmosféricas, etc. – faz com que o comportamento do fluxo de ar seja bastante variado. Entretanto, baseia-se o estudo da ventilação nos parâmetros geralmente comuns às escavações e nas leis de termodinâmica.

De forma geral, o fluxo de ar entre as aberturas de uma mina só ocorre em resposta à variação de energia no sistema. Hartman (1997) aponta que existem apenas dois tipos de energia para o sistema de ventilação de uma mina: natural e mecânica.

3.1.4.1. Ventilação Natural

A ventilação natural é o fluxo de ar que se estabelece em uma escavação subterrânea sem a necessidade de equipamentos mecânicos. Ela é provocada pela diferença de temperatura entre as aberturas da mina e pela energia térmica associada ao ar quando este passa através das galerias.

Os pontos de abertura da mina apresentam condições termodinâmicas diferentes, sobretudo pela diferença de elevação entre eles. Mesmo para pontos em elevação semelhante, a localização espacial única faz com que cada ponto apresente condições meteorológicas distintas, conforme ressaltado por Ramani (1992). Esta pequena diferença de temperatura provoca diferença de densidade e assim a pressão gerada, conhecida como NPV (pressão de ventilação natural) induz um fluxo de ar na mina de forma natural (deslocamento de uma coluna de ar sob outra). Ao mesmo tempo, à medida que o ar circula no interior das galerias ele pode sofrer variações térmicas – devidas ao gradiente geotérmico, autocompressão, oxidação, troca de calor com água, rocha – que favorecem e sustentam o fluxo de ar.

Em função da dependência de fatores climáticos e naturais, a ventilação natural é variável e instável. Em regiões onde há uma grande variação de temperatura no verão e inverno, o gradiente térmico entre superfície e subterrâneo favorece a ventilação natural. Entretanto, nas demais estações ou regiões onde a amplitude térmica anual é baixa, este sistema de ventilação não é favorecido.

Além disto, o controle da direção do fluxo de ar em subterrâneo é difícil e pouco previsível. Sobretudo para minas rasas, a amplitude térmica não é tão expressiva e varia bastante entre valores positivos e negativos, o que pode levar à inversão ou cessão do fluxo de ar.

Com isso, torna-se difícil o controle adequado e intencional do fluxo de ar que é comumente necessário nas operações subterrâneas. Por estas razões, atualmente ela não costuma ser utilizada como sistema de ventilação de minas.

3.1.4.2. Ventilação Mecânica

A ventilação mecânica surge como resposta a não viabilidade de aplicação da ventilação natural quanto à segurança e produtividade nas minas.

Este sistema de ventilação engloba todo maquinário utilizado para induzir o fluxo de ar nas aberturas das minas ou dutos. Faz-se uso mais constante de ventiladores, mas podem ser utilizados compressores e injetores.

A literatura, conforme descrito por Ramani (1992) distingue três aplicações distintas para ventiladores na ventilação de minas: ventiladores principais, os de reforço (*booster*) e os auxiliares.

- Ventiladores principais → normalmente permanentes e de grande capacidade, estes são os ventiladores com a maior responsabilidade na produção do fluxo de ar na mina;
- Ventiladores de reforço (*booster*) → utilizados em regiões da mina onde o fluxo originário do ventilador principal é inadequado;
- Ventiladores auxiliares → em geral de pequeno porte, portáteis e de instalação temporária utilizados na ventilação de locais de trabalho onde não há ventilação (ex: regiões de fundo de saco). Costuma-se utilizar dutos para conduzir o fluxo de ar diretamente para frente de trabalho.

A Figura 3.3 ilustra um circuito de ventilação típico de uma mina subterrânea. O ar fresco entra no circuito através de um ou mais *shafts* (ou outra estrutura de desenvolvimento primário da mina em conexão com a superfície, como rampas, áditos, *slope*). Este ar movimenta-se pelas galerias de admissão até a frente de trabalho ou até áreas onde esteja

presente ar “viciado” (contaminado com poeira, gases poluentes e/ou tóxicos). O ar contaminado direciona-se então pelas galerias de retorno até ser retirado da mina, via *shaft* ou rampa.

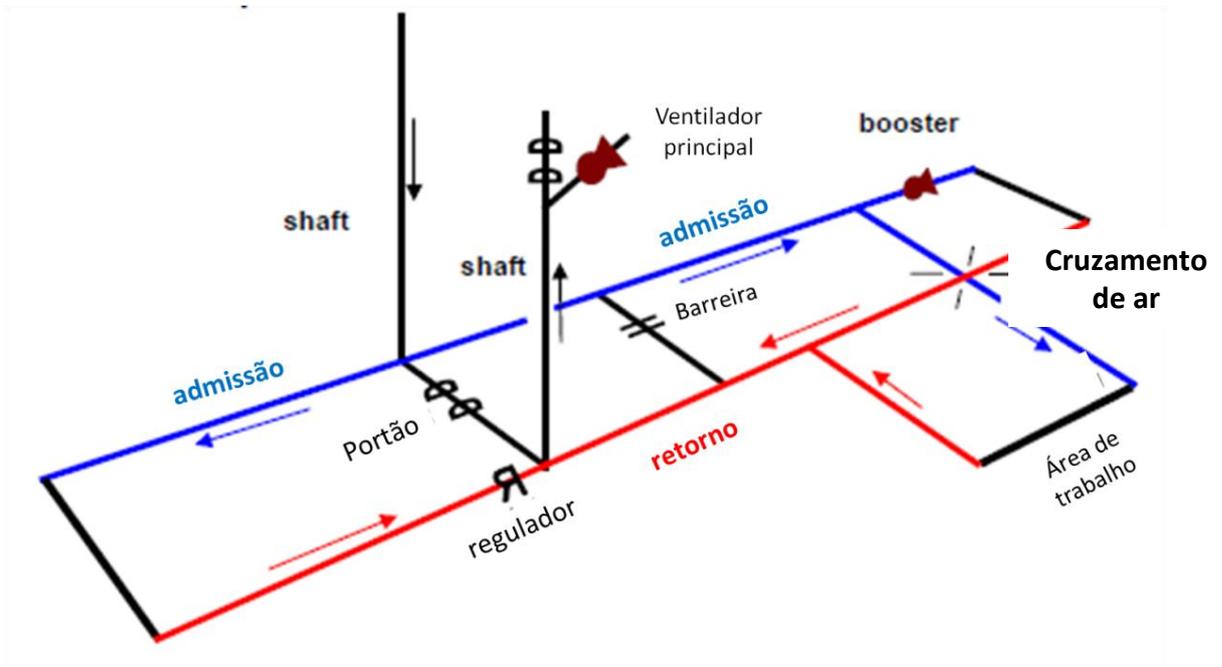


Figura 3.3: Esquema simplificado de sistema de ventilação (McPHERSON, 1993)

A condução do ar fresco ou viciado dentro da mina é usualmente feita com auxílio de *boosters* e ventiladores auxiliares. Dependendo da necessidade do sistema é possível fazer combinações de ventiladores em série ou em paralelo, respectivamente visando ao aumento de pressão ou de vazão de ar. Combinações de sistemas de ventilação em série ou paralelo definem uma rede de ventilação simples.

A condução do ar entre a superfície e subterrâneo é comandada por ventiladores principais. A fonte de ventilação mecânica principal é majoritariamente localizada na superfície, pois facilita o acesso, manutenção e proteção do ventilador. Além disto, pode-se utilizar um único ou dois ventiladores, bem como instalá-lo em um sistema de exaustão (infla o ar viciado para fora da mina) ou de adução (sufla o ar fresco para dentro da mina).

A Figura 3.4 ilustra as configurações possíveis na instalação do ventilador principal, sendo importante destacar que:

- Sistema de adução → a mina irá trabalhar com pressões superiores à atmosféricas e o ventilador lidará somente com ar não contaminado (menor desgaste e corrosão, menor manutenção);
- Sistema por exaustão → a mina trabalhará com pressões inferiores à atmosférica;
- Sistema misto → permite alguma região da mina ter pressão semelhante à atmosférica.

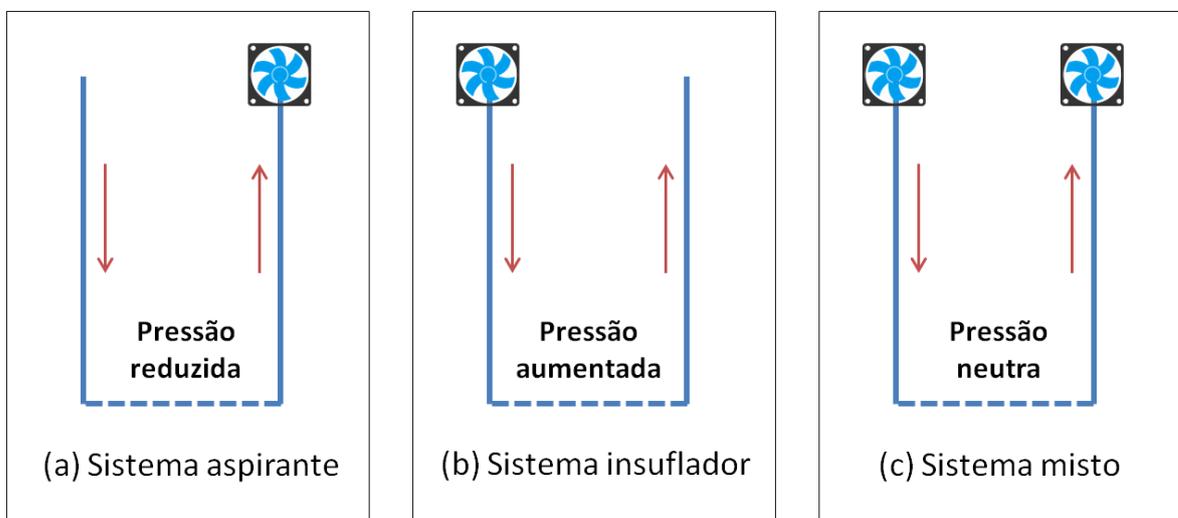


Figura 3.4: Posição do ventilador principal em sistemas de ventilação (McPHERSON, 1993)

Outras estruturas são comuns no *layout* de ventilação subterrâneo para auxiliar a direção e administrar taxas corretas do fluxo de ar, tais como: reguladores, portões, barreiras e cruzamentos de ar (JEN TIEN, 1999).

- Reguladores → sistema que realiza a abertura ou fechamento de orifícios para regular vazão de ar na ventilação de uma seção da mina. Em geral, constitui-se de uma porta com um sistema de persianas ou painel de correr, com acionamento manual ou automático.



Figura 3.5: Regulador em mina subterrânea (KASHNIKOV, 2016)

- Portões → instalados em locais onde é necessário manter um acesso entre um sistema de admissão e de retorno de ar. É constituído de um sistema com duas portas, separadas por uma determinada distância, para permitir a passagem entre os sistemas de ar sem nele interferir. As portas devem ser instaladas de modo a abrir para o lado de maior pressão, propiciando o autofechamento e mantendo o sistema de vazão de ar.

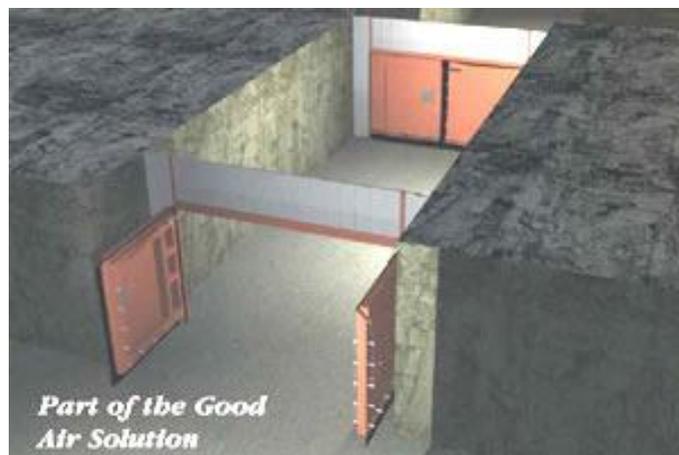


Figura 3.6 - Esquema de portões em mina subterrânea (KASHNIKOV, 2016)

- Barreiras → são estruturas físicas permanentes (parede de alvenaria, de madeira, de aço ou material depositado) geralmente construídas para isolar uma frente de trabalho exaurida onde é desnecessário manter circuito de ventilação;

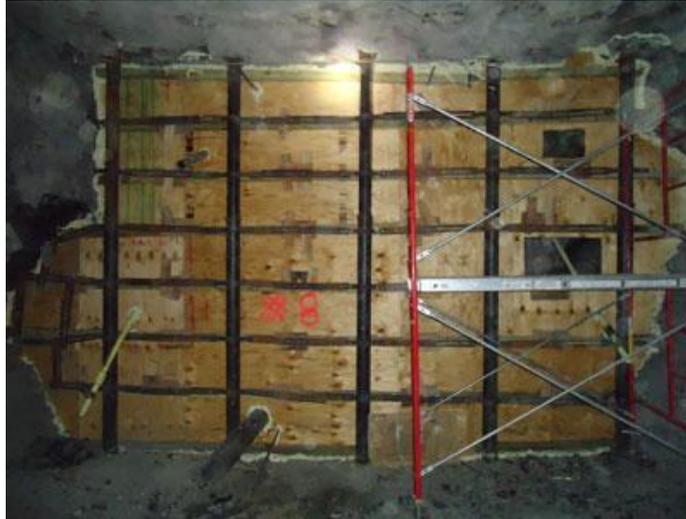


Figura 3.7 - Barreira instalada em mina subterrânea (KASHNIKOV, 2016)

- Cruzamentos de ar → estruturas construídas em regiões onde o ar fresco e o ar viciado se cruzam, porém não podendo se misturar. Em geral, uma seção de passagem é feita na galeria por onde um fluxo de ar é direcionado, e o outro fluxo é direcionado para fora desta seção.

De forma simplificada, pode-se dizer que um sistema de ventilação precisa de três elementos básicos para funcionar corretamente e operacionalmente:

- Uma fonte de ventilação mecânica principal e auxiliares;
- Galeria de conexão entre os sistemas de admissão e de retorno do ar;
- Elementos de controle do fluxo de ar.

3.2. Fatores que alteram a qualidade do ar subterrâneo

3.2.1. Gases

O ar, ao passar pelas escavações subterrâneas, muda sua composição atmosférica original, em função de dois fatores principais:

- Fatores naturais → Gases presentes nas estruturas rochosas anteriormente nela aprisionados (comumente metano e monóxido de carbono); reações químicas entre o ar e água ou com os minerais (como oxidações, sulfetação, etc).

- Fatores antrópicos → presença humana (respiração, liberando CO₂ e consumindo O₂) combinada com operação de equipamentos à base de diesel (consumo de oxigênio e liberação de gases de combustão).

Em trabalho desenvolvido por Le Roux (1990) levantaram-se os gases mais comuns em ambiente subterrâneo e suas fontes, conforme Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Principais gases presentes em ambiente subterrâneo (LE ROUX, 1990)

Nome	Símbolo	Peso específico relativo ao ar	Fonte
Dióxido de Carbono	CO ₂	1,5	Respiração, Oxidação, Detonação, Exaustão diesel, Fogo
Monóxido de Carbono	CO	0,97	Detonação, Diesel, Fogo
Gases Nitrosos	NO	1,04	Detonação, Diesel, Fogo, Soldagem, Queima de explosivos
	NO ₂ , etc.	1,06	
Metano	CH ₄	0,55	Fissuras na rocha
Hidrogênio	H ₂	0,07	Carregamento de baterias, Fissuras rocha
Sulfeto de Hidrogênio	H ₂ S	1,2	Fissuras rocha, Água estagnada
Cloro	Cl ₂	2,5	Cloração da água
Aldeídos	HCHO, etc	1,04	Exaustão diesel
Amônia	NH ₃	0,6	Plantas de resfriamento, Detonação
Acetileno	C ₂ H ₂	0,93	Soldagem
Freon 11 ou 12	CCl ₃ F / CCl ₂ F ₂	4,8 / 4,2	Plantas de resfriamento
Cianeto de Hidrogênio	HCN	0,94	“Sandfilling”
Oxigênio	O ₂	1,1	Ar
Nitrogênio	N ₂	0,97	Ar
Hélio	H ₂	0,28	Associado à metano

Dependendo da concentração destes gases, a operação de equipamentos com motores à combustão pode ser prejudicada, efeitos nocivos podem ser produzidos no ser humano, além do risco de explosão/incêndio. Em geral, os gases são classificados em:

- Asfixiante → gases com propriedade de deslocar o oxigênio do ambiente, porém sem provocar efeitos fisiológicos significativos. Pode ocorrer asfixia pela inalação insuficiente de O₂. (ex: metano)
- Tóxicos → gases que podem provocar doenças ou morte, sem ou com a presença de oxigênio no ambiente. (ex: monóxido de carbono)
- Explosivos → gases que dentro de certa concentração e com estímulo de ignição podem explodir (ex: metano, monóxido de carbono, hidrogênio).

A Norma Regulamentadora NR-15 (BRASIL, 1978) estabelece os limites de tolerância de concentrações de alguns dos gases perigosos em subterrâneo. Na Tabela 3.2 podem-se verificar estes limites e os efeitos na saúde do trabalhador caso sejam desrespeitados.

Tabela 3.2 - Limites de tolerância e efeitos de gases (Le Roux, 1990)

Nome	Símbolo	Limite de Tolerância	Característica	Percepção e Sintomas
Dióxido de Carbono	CO ₂	3900 ppm	Asfixiante	Irritação nos olhos, nariz e boca
Monóxido de carbono	CO	39 ppm	Tóxico	Palpitação, dor de cabeça, debilidade geral
Dióxido de Enxofre	SO ₂	4 ppm	Tóxico	Irritação nos olhos e vias respiratórias
Dióxido de Nitrogênio	NO ₂ , etc.	4 ppm	Tóxico	Ação corrosiva das vias respiratórias, irritação no nariz e na garganta, dos pulmões, tosse e edema pulmonar.
Metano	CH ₄	1%	Natural	Combustão entre 5 e 15%
Amônia	H ₂	8 ppm	Tóxico	Irritação nos olhos, nariz e garganta
Sulfeto de Hidrogênio	H ₂ S	8 ppm	Natural	Cheiro forte parecido com ovo podre

Além da exaustão de gases potencialmente asfixiantes, explosivos ou tóxicos, a grande preocupação da ventilação quanto à concentração de gases gira em torno de garantir fornecimento mínimo de oxigênio ao trabalho humano e motores à combustão.

A Norma Regulamentadora NR-22 (BRASIL, 1978) estabelece que em locais onde houver pessoas transitando ou trabalhando, a concentração de oxigênio no ar não deve ser inferior à 19% em volume. Abaixo deste valor, riscos à saúde humana podem ser produzidos: tontura, náusea, desorientação, desmaio, coma, culminando até a morte.

3.2.2. Particulados

A poeira, partículas em suspensão no ar, é o segundo principal contaminante do ar em ambiente subterrâneo. Sua origem remete, sobretudo, a duas atividades principais:

- Desmonte ou movimentação de material rochoso;
- Emissão de DPM (*Diesel Particulate Matter*) → partículas sólidas emitidas na combustão de motores à diesel (ex: equipamentos de lavra e transporte subterrâneo).

Ambas as substâncias, de origem rochosa ou DPM, podem ser nocivas à saúde humana. McPherson (1993) descreve riscos tóxicos, cancerígenos, fibrogênicos e até mesmo explosivos.

A legislação brasileira, em suas Normas Regulamentadoras NR-15 e NR-22 (BRASIL, 1978) estabelecem limites de tolerância apenas para a sílica livre, para as operações com manganês e seus compostos ($5\text{mg}/\text{m}^3$) e para fibras respiráveis de asbesto de crisotila ($2,0\text{ fibras}/\text{cm}^3$).

3.2.3. Calor e temperatura

O controle da temperatura e umidade em subterrâneo deve-se, sobretudo, segundo McPherson (1993), à necessidade de se manter estes parâmetros em faixa adequada para que o corpo humano esteja seguro em condições de trabalhar eficientemente.

De acordo com Johnson (1992), um bom padrão a ser seguido é manter a temperatura efetiva entre 21°C e $26,5^\circ\text{C}$, pois indica que nesse intervalo o conforto humano é satisfatório e o rendimento de seu trabalho é máximo. Quando a temperatura estiver entre $26,5^\circ\text{C}$ e 30°C

recomenda-se resfriamento do ambiente para assegurar melhor conforto. Abaixo dos 16°C a sensação de frio torna o ambiente desconfortável. Entretanto entre 16° e 21° não se verifica ganho aparente em desempenho que justifique resfriamento.

A Figura 3.8 mostra a relação entre temperatura e desempenho do trabalho humano.

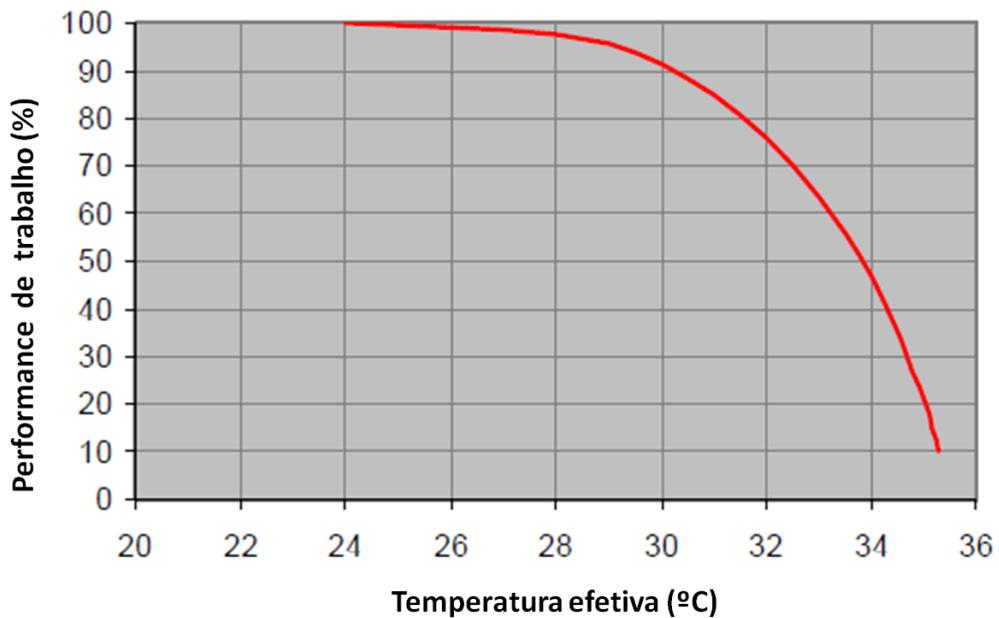


Figura 3.8 - Influência da temperatura no trabalho (McPHERSON, 1993)

A Norma Regulamentadora NR-15 (BRASIL, 1978) estabelece para o Brasil os limites de exposição do trabalhador ao calor em diferentes regimes de trabalho, conforme pode-se verificar no quadro comparativo da Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Regimes de trabalho e exposição ao calor NR-15

Regime de Trabalho Intermitente com Descanso no Próprio Local (por hora)	Tipo de Atividade		
	LEVE	MODERADA	PESADA
Trabalho contínuo	Até 30,0	Até 26,7	Até 25,0
45 min trabalho 15 min descanso	30,1 a 30,6	26,8 a 28,0	25,1 a 25,9
30 min trabalho 30 min descanso	30,7 a 31,4	28,1 a 29,4	26,0 a 27,9
15 min trabalho 45 min descanso	31,5 a 32,2	29,5 a 31,1	28,0 a 30,0
Não é permitido o trabalho sem a adoção de medidas adequadas de controle	Acima de 32,2	Acima de 31,1	Acima de 30,0

Em seus estudos, Varaschin (2016) classifica as fontes de calor na mina subterrânea em duas: naturais ou antrópicas. Um modelo esquemático pode ser visto na Figura 3.9.

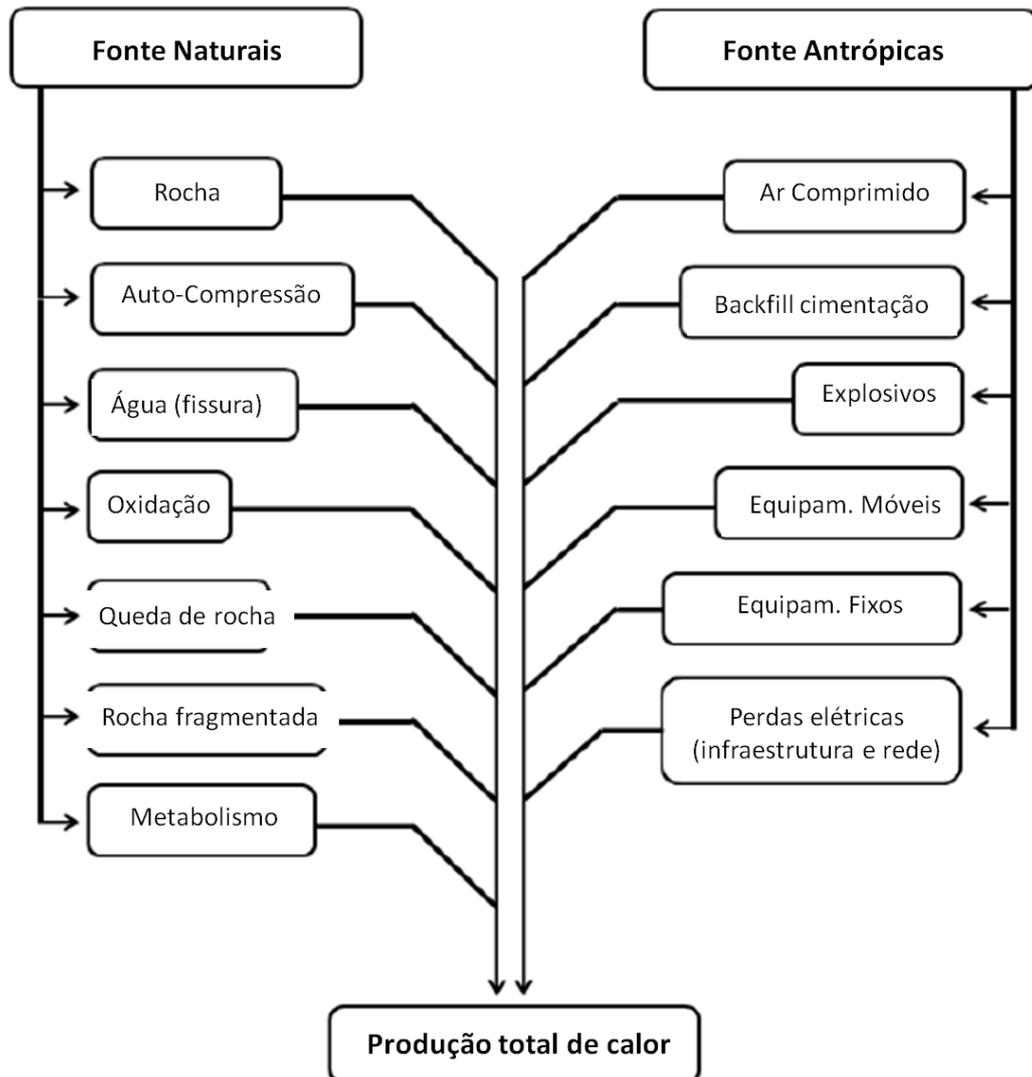


Figura 3.9 - Decomposição das fontes de calor em minas subterrânea - (VARASCHIN, 2016)

A grande variedade de fontes de calor, muitas das quais complexas de se mensurar, torna esta variável um elemento crítico na determinação de vazões de ar do plano de ventilação. Varaschin (2016) aponta que o calor proveniente dos equipamentos móveis (sobretudo os movidos a diesel), juntamente com aquele devido ao maciço rochoso, é costumeiramente utilizado como fator preponderante no dimensionamento. O estudo de Stinnette (2013) aborda uma metodologia de cálculo da vazão de ar requerida em função da frota de equipamentos a diesel.

3.3. Demanda de ar e legislação em vigor

No dimensionamento de sistemas de ventilação, a determinação da vazão de ar necessária (m^3/s ou m^3/min) para assegurar um ambiente seguro à operação é um parâmetro chave de projeto e que norteia a legislação mineral.

Kerai e Halim (2013) e Stinnette (2013) sustentam que a determinação do parâmetro de vazão em projetos de mineração subterrânea é um processo complexo, porém essencial para o sucesso do empreendimento. Se superdimensionado, implica em custos de investimento e operacionais que podem comprometer em algum nível a economicidade do empreendimento; mas se subdimensionados poderá implicar em restrições operacionais (ritmo/escala de produção) e riscos aos trabalhadores que podem levar à interdição da operação.

Em uma abordagem prática, a determinação de vazão de ar de um projeto subterrâneo é feita estudando-se alguma metodologia usualmente aceita pela equipe de projeto (*benchmark*, derivação empírica, imposições legislatórias, *Exhaust Quality Index*, ALARA, etc), e a vazão de projeto escolhida é aquela mais restritiva, desde que respeite o valor mínimo regulatório local.

Cada país apresenta regulamentações a respeito deste dimensionamento, sendo a Norma Regulamentadora da Mineração NRM-06 (BRASIL, 2015) a principal responsável por delimitar estes parâmetros no Brasil, em concordância com o disposto na NR-22 (BRASIL, 1978) do Ministério do Trabalho e Emprego (MTE).

Os principais cálculos são:

- Demanda de ar por pessoa;

$$QT = 2\text{m}^3/\text{min} / \text{pessoa na frente de trabalho}$$

- Demanda de ar por potência dos equipamentos;

$$QT = 3,5 (P1 + 0,75 \times P2 + 0,5 \times Pn) [\text{m}^3/\text{min}]$$

Onde: QT = vazão total de ar fresco em metros cúbico por minuto

P1 = potência em cavalo-vapor do equipamento de maior potência em operação

P2 = potência em cavalo-vapor do equipamento de segunda maior potência em operação

Pn = somatório da potência em cavalo-vapor dos demais equipamentos em operação

- Demanda de ar por consumo de explosivos:

$$QT = (0,5 \times A) \times V / t \quad [\text{em m}^3/\text{min}]$$

Onde: QT = vazão total de ar fresco em m³/min

A = quantidade total em kg de explosivos empregados por desmonte

t = tempo de aeração (reentrada) da frente de trabalho em atividade em minutos

V = volume gasoso gerado por quilo de explosivo em m³/kg

- Demanda de ar em função da velocidade mínima do ar:

A velocidade do ar no subsolo não deve ser inferior a 0,2 m/s nem superior à média de 8,0m/s onde haja circulação de pessoas.

Ressalta-se que estes parâmetros de ventilação são referentes às minas em geral, exclusas as de carvão, para as quais há legislação específica ou adendos, sempre de caráter mais restritivo no mundo todo.

Cabe destacar ainda que o valor de vazão calculado deve ser ajustado de forma a assegurar as perdas de pressão que o fluxo de ar sofre. Em função da resistência oferecida ao ar em sua circulação, perdas por fricção e perdas por choque devem ser consideradas. Em Ramani (1992), McPherson (1993) e Hartman (1997) pode-se encontrar um maior detalhamento das metodologias de cálculo desenvolvidas.

Entre as metodologias de cálculo acima citadas, aquela que é tradicionalmente referenciada em legislação (por demonstrar-se comumente mais restritiva) pela grande maioria dos países no mundo é a demanda de ar por potência de equipamentos. Tradicionalmente seu cálculo é realizado multiplicando-se a potência instalada dos equipamentos a diesel (kWh) por um valor nominal (m³/s / kWh).

Este valor nominal é usualmente estabelecido através de normativas em legislações, variando entre países e regiões conforme levantamento na Tabela 3.4

Tabela 3.4: Legislações mundiais sobre demanda por ventilação para equipamentos a diesel (Stinnette, 2013)

País	Legislação sobre demanda de ventilação
Austrália	0,06 m ³ /s por KW (mínimo New South Wales) 0,05 m ³ /s por KW (mínimo Western Australia)
Canadá	Específico para cada província, entre 0,045 – 0,092 m ³ /s por KW (mínimo). Usualmente: 0,06 m ³ /s por KW
Chile	2,83 m ³ /min por HP (mínimo) - (Equivalente a 0,063 m ³ /s por KW)
China	0,067 m ³ /s por KW
África do Sul	0,063 m ³ /s por KW (mínimo baseado em “boas práticas”)
Indonésia	0,067 m ³ /s por KW
Brasil	3,5 m ³ /min por HP - (Equivalente a 0,08 m ³ /s por KW)

De acordo com Stinnette (2013), a origem deste valor nominal é desconhecida, embora justificado pelos órgãos regulatórios tendo bases científicas para assegurar a diluição de gases, dissipação de calor, DPM, etc. Entretanto, estes valores foram estabelecidos décadas atrás, e sua aplicação nos dias de hoje acaba por carregar um caráter rígido ao não considerar evoluções tecnológicas e fatores pontuais, tais como:

- Novos equipamentos com redução de emissões e DPM → Resultado de avanços tecnológicos devido ao planejamento governamental e industrial em programas tais como “USA TIER I – IV” e “EU Euro Stage I – IV” para redução de emissões dos equipamentos a diesel, filtros eficientes para particulados;
- Adoção de maquinário elétrico em subterrâneo → zero emissão, redução de calor;
- Especificidades locais do projeto → Perfil geotérmico local, design da mina, fatores econômicos.

Portanto, a defasagem legislatória na determinação da vazão de ar apresenta-se hoje e em futuro próximo como fator de superdimensionamento da ventilação, podendo impactar na economicidade de projetos minerais.

Um estudo realizado por Haney (2012) *apud* Stinnette (2013), conforme Tabela 3.5, buscou estimar a demanda de ar necessária para diluição de gases e para dissipação de DPM comparando-se equipamentos a diesel de diferentes níveis tecnológicos (baseados no programa Norte Americano TIER I-IV). O objetivo é criar um parâmetro metodológico que possa ser usado como referência aos órgãos regulatórios para atualização da legislação, pois atualmente equipamentos TIER III já são comercialmente aplicados e o nível IV encontra-se em fase final de desenvolvimento e aplicações piloto (limite 2025).

Pode-se observar que o parâmetro regulatório usual de 0,06 m³/s/Kwh é coerente com equipamentos anteriores ao programa de redução (“Não Conforme”), enquanto que equipamentos nível III do estudo demandam pouco além da metade (0,032 m³/s/Kwh) do que prevê a legislação atual.

Tabela 3.5: Demanda por ventilação para equipamentos à diesel do programa TIER

EPA Tier		Nº de eqptos testados	Demanda por ventilação (m ³ /s/kW)	PI (m ³ /s/kW)	PI x 5 (m ³ /s/kW)
Não conforme	< 73 kW	21	0,05 ± 0,057	0,119 ± 0,088	0,595 ± 0,438
	> 73 kW	41	0,038 ± 0,008	0,059 ± 0,024	0,297 ± 0,119
Tier I / II	< 73 kW	73	0,03 ± 0,0095 *	0,041 ± 0,015	0,206 ± 0,076
	> 73 kW	141	0,035 ± 0,008 *	0,012 ± 0,01	0,098 ± 0,047
Tier III	< 73 kW	27	0,032 ± 0,004 **	0,028 ± 0,015	0,139 ± 0,071
	> 73 kW	47	0,025 ± 0,003 **	0,025 ± 0,009	0,123 ± 0,046
Tier IV	-	2	0,025 ± 0,003 **	0,002 ***	0,010 ***

(*) Baseado em NO / (**) Baseado em CO₂ / (***) Baseado em um PI de 0,01 gm/hp-hh

PI = Particulate Index DPM (5x é a recomendação normativa da MSHA)

Se no atual cenário de novos equipamentos a diesel a demanda de ar regulamentada já se demonstra ultrapassada, a perspectiva de eletrificação total dos equipamentos em frota subterrânea é um argumento ainda mais forte para motivar a revisão. Isto porque dos fatores que norteiam o valor nominal legislativo em $\text{m}^3/\text{s}/\text{kWh}$ (gases, DPM, calor), dois deles não se aplicam a esta tecnologia (equipamentos elétricos não emitem gases, nem DPM) e estudos apontam potencial redução na demanda de ar para dissipação de calor em até 40% com a eletrificação (Stinette, 2013).

Outro fato que reforça a suposição do superdimensionamento pode ser ilustrado pelas declarações emitidas pelo CEO Brent Bergeron, da mineradora Goldcorp Inc., que desenvolve um projeto totalmente elétrico para a mina Borden em Ontário (Canadá), e busca ainda junto aos órgãos regulatórios locais a revisão da legislação aplicável.

Canadian Mining Journal: Vocês encontraram algum impasse regulatório no licenciamento da mina de Borden, por ser um projeto totalmente elétrico?

Brent Bergeron: Uma das coisas que nós ainda estamos trabalhando com o Governo do Estado de Ontário são as especificações legais impostas ao sistema de ventilação para uma mina subterrânea. No Estado do Quebec, onde temos a mina Eleonore com sistema de ventilação sob demanda, conseguimos trabalhar junto ao Estado e atualizar as normas de ventilação para levar em consideração esta tecnologia. Para a mina de Borden (Ontário), a legislação atual nos obriga a continuar ventilando a mina como se ela operasse com equipamentos a diesel em subterrâneo, liberando gases e particulados. Portanto, estamos trabalhando junto ao Governo Estadual e o Ministério do Trabalho para modernizar as leis de Ontário. É um trabalho que exige uma dedicação extra de nossa parte, mas acredito que é positivo, pois permite trabalharmos em conjunto com as autoridades para assegurar que eles compreendam e façam parte deste momento de inovação que a companhia e o setor estão compromissados.

(CMJ, 2018)

Como a legislação para ventilação baseia-se em um parâmetro de potência instalada a diesel, em um cenário de eletrificação dos equipamentos não há precedente regulatório que norteie cientificamente o cálculo para esta evolução tecnológica.

A legislação brasileira NRM-06 cita no item 6.2.4.3 uma vazão de $15\text{m}^3/\text{min}$ ($0,25\text{ m}^3/\text{s}$) por m^2 da área da frente de trabalho em atividade caso não se esteja utilizando equipamentos à diesel. Entretanto, a aplicação deste conceito no cenário de eletrificação não aparenta dimensionar a razão de calor emitido por equipamentos elétricos de diferentes portes (kWh).

4. EQUIPAMENTOS EM FROTA SUBTERRÂNEA

4.1. Frota tradicional e diesel como fonte motriz

Em uma operação de mineração subterrânea moderna, uma grande diversidade de equipamentos é utilizada nas operações. Estes equipamentos podem ser aplicados diretamente como suporte ao ciclo produtivo de perfuração e desmonte / carregamento e transporte, ou como equipamentos auxiliares.

Destacam-se a seguir os principais equipamentos utilizados para mineração subterrânea em rocha dura (*hard rock mine*): jumbo/*fandrill*, plataforma elevada, *cabolts*, carregadeiras, LHD's, caminhões, niveladoras, caminhões ANFO/projetores de concreto, veículos leves (VL's) para transporte de pessoal ou para manutenção, etc.

A grande maioria destes equipamentos é motorizada por unidades de combustão interna, sendo diesel o combustível largamente utilizado. Kenzy e Ramani (1980) *apud* Stinnette (2013) apontam a correlação estrita entre o desenvolvimento da tecnologia do motor a diesel e sua aplicação na mineração subterrânea na América do Norte, sendo um importante fator para o aumento de escala produtiva, conforme Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Cronologia da aplicação de diesel em minas subterrâneas – (Stinnette, 2013).

1882	Invenção do motor a diesel
1886	Primeira locomotiva a gasolina em uma mina subterrânea (Alemanha)
1897	Motor a diesel reduzido para dimensões aplicáveis em equipamentos
1906	Primeiro equipamento a gasolina em mina nos EUA
1915	Maioria dos Estados nos EUA proíbem equipamentos à gasolina em minas subterrâneas
1927	Primeiro equipamento a diesel em mina na Alemanha
1934	Início da aplicação de equipamentos a diesel em minas subterrâneas de carvão nos EUA, França e Reino Unido
1939	Primeiro equipamento a diesel em mina subterrânea nos EUA (Pennsylvania)
1946	Primeiro equipamento a diesel em mina subterrânea de carvão nos EUA
1950	Desenvolvimento da primeira LHD movida à diesel

Em sua tese, Stinnette (2013) cita como fatores que levaram à larga aplicação do diesel no contexto mineral:

- Motores a diesel produzem maior torque e geram menor quantidade de monóxido de carbono quando comparados a motores similares movidos por outros combustíveis fósseis;
- O diesel apresenta maior densidade energética (MJ / litro) comparada à gasolina, além de apresentar menor pressão de vapor e menor ponto de fulgor, tornando-o mais seguro em aplicações subterrâneas.

Dependendo da escala de produção da mina, equipamentos a diesel podem estar presentes em maior ou menor quantidade, porém via de regra contribuem para a emissão de gases tóxicos (CO, CO₂, NO_x, H₂S), particulado de diesel (DPM) e emissão de calor (via exaustão de gases e perdas térmicas do motor).

Gases e particulados de combustão de motores a diesel são alvos de estudos cada vez mais minuciosos, que apontam o potencial tóxico e até mesmo cancerígeno à saúde humana. Stinnette (2013) ressalta dois estudos publicados em 2012 por renomados e influentes órgãos internacionais, como o *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH) e o *International Agency for Research on Cancer* (IARC), provando a correlação entre exposição a gases/particulado de diesel e desenvolvimento de câncer em trabalhadores.

Tal fato estimulou autoridades reguladoras da atividade mineral no mundo todo a impor restrições cada vez mais contundentes nos limites de concentração permissíveis destes componentes no ambiente de trabalho subterrâneo, e assim exigindo um grande esforço de estruturas de ventilação.

Ao mesmo tempo, a tendência de aprofundamento das minas (seja em função da continuidade de uma operação existente ou devido à escassez de depósitos econômicos em superfície) condiciona trabalhos em profundidades expressivas (ex: abaixo de 2.000m) onde a elevada temperatura e baixa concentração de oxigênio exigem ventilação intensa e até mesmo resfriamento do ar. Neste cenário, a operação de equipamentos a diesel torna-se um agravante pelo calor e gases/particulados emitidos.

Diante deste contexto, os fabricantes de equipamentos para mineração subterrânea buscaram desenvolver alternativas para substituição do diesel como fonte motriz, sendo a eletrificação a principal alternativa.

4.2. Tecnologia disponível para eletrificação de equipamentos

Em seu artigo, Paraszczak *et al.* (2014) apontam que a tecnologia de eletrificação de equipamentos para mineração está em constante evolução. Embora existam registros de aplicação desta modalidade energética na mineração há mais de 100 anos, ela ocorreu historicamente em distintos níveis de maturidade tecnológica e de escala operacional.

O autor citado ressalta ainda que as opções disponíveis aplicam-se majoritariamente para equipamentos da categoria carregamento e transporte, com especial destaque para LHD. De acordo com o referido autor, podem-se categorizar os equipamentos elétricos atualmente disponíveis conforme a seguir:

- Equipamentos movidos à bateria (*battery-powered, full-electric*)
- Equipamentos elétricos à cabo (*cable-powered*)
- Equipamentos alimentados por linha elétrica (*trolley-electric*)
- Equipamentos híbridos

As tabelas presente nos Anexo 1 e Anexo 2 sintetizam os principais pontos levantados por Paraszczak *et al.* (2014) ao discutir cada uma destas categorias, com atualizações feitas pelo autor.

Embora o enfoque deste levantamento esteja direcionado para LHD e caminhões, pode-se notar uma movimentação da indústria mineral no sentido de eletrificação à baterias para outros equipamentos (*jumbos/fandrill; VL's*) inclusive com a chegada de novos fabricantes.

De forma geral, pode-se dizer que os equipamentos elétricos a cabo encontram-se bem difundidos e comercialmente acessíveis para máquinas do tipo LHD. É a tecnologia de eletrificação mais popularizada atualmente, embora as perspectivas de sua evolução para outros equipamentos (caminhões, especialmente) sejam limitadas devido à restrição de distância percorrida imposta pelo cabeamento.

A tecnologia mais promissora é a modalidade movida à bateria, sobretudo com os avanços na tecnologia de armazenamento de energia em componentes de lítio. Ainda há limitações tecnológicas quanto à durabilidade das baterias e seu ciclo de recarga, mas que provavelmente serão solucionadas com os estudos dos fabricantes.

De acordo com informações levantadas por Paraszczak *et al.* (2014) para os modelos da fabricante RDH, uma LHD ou um caminhão à bateria conseguem ter autonomia de operação em média de 4 horas. Dado que usualmente um turno de operação subterrânea no Brasil é de 6 horas, sendo em média 4,5 horas trabalhadas, esta tecnologia estaria próxima a entregar autonomia sem prejudicar o rendimento de trabalho no turno. Entretanto, em muitos países no mundo (ex: Canadá, Austrália) a carga horária média de um turno varia entre 8 e 12 horas, o que ainda demandaria interrupção do ciclo operacional para troca de baterias.

A Figura 4.1 ilustra a linha de equipamentos elétricos à bateria da fabricante Artisan aplicados ao trabalho em ambiente subterrâneo (caminhão e LHD), recentemente adquirida pela fornecedora de equipamentos para mineração Sandvik.



Figura 4.1: Linha *battery-electric* da fabricante Artisan / Sandvik - (Artisan Website)

5. APLICAÇÕES DE FROTA ELÉTRICA NA MINERAÇÃO SUBTERRÂNEA

5.1. Histórico e literatura técnica

De acordo com Emilsson (2012), o desenvolvimento de equipamentos elétricos para frota de minas subterrâneas remonta à década de 1970, quando a fabricante Sandvik desenvolve LHDs elétricas (a cabo). Entretanto, a aplicação destes equipamentos somente ganha escala operacional em meados da década de 1980, com destaque para a introdução de e-LHDs na mina de Kiruna (Suécia).

Desde então, estudos técnicos, teses e artigos abordando os potenciais benefícios na substituição em maior escala de equipamentos a diesel por equipamentos elétricos na mineração subterrânea vem sendo desenvolvidos.

Os trabalhos de Moore (2010), McCarthy (2011), Jacobs (2013), Paraszczak et al (2014) destacam como principais vantagens para adoção de equipamentos elétricos em subterrâneo:

- Não emissão de gases estufa (GHG) e de particulado de diesel (DPM);
- Redução na emissão de calor;
- Menores custos de ventilação;
- Menor consumo energético operacional (\$/t);
- Menores custos de manutenção;
- Menores níveis de ruído e vibração.

Embora os diversos estudos citados apontem vantagens importantes na adoção de frota elétrica, a aplicação desta modalidade em empreendimentos minerários ainda é bastante restrita e caminha lentamente. Os motivos para este cenário não são explicitamente descritos na literatura, e muitas vezes há divergências entre os autores. Entretanto, pode-se citar:

- Maior custo de aquisição de veículos elétricos (OPEX);
- Ausência, escassez e divergência de *benchmark* no processo de estudos de viabilidade para implementação desta tecnologia, gerando aversão ao risco em um empreendimento de aplicação intensiva de capital e de maturação longa.

- Questionável confiabilidade e durabilidade de equipamentos elétricos à bateria (estudos ainda em curso para baterias de lítio);
- Pouca flexibilidade operacional de equipamentos elétricos à cabo ou do tipo *trolley*;
- Impactos operacionais na mudança de modalidade energética (ciclo de carga-descarga, velocidade de operação).
- Inflexibilidade / ausência de revisões na legislação sobre ventilação subterrânea, ainda estabelecida com base em critérios de equipamentos a diesel (ex: vazão mínima de ar de X m³/s por kWh de equipamento a diesel).

Por muitos anos a eletrificação de equipamentos em mina subterrânea ficou usualmente restrita ao uso de e-LHDs, tendo-se um relativo sucesso com a modalidade à cabo. A eletrificação de demais equipamentos de maior porte, em especial caminhões, ficou restrita a poucas unidades produtivas.

Levantamentos feitos nos trabalhos de Moore (2010, 2014) e Paraszczak et al (2014) citam operações de caminhões elétricos em minas na Suécia, Canadá, Austrália, Espanha, EUA e Kazaquistão com diferentes níveis de sucesso. Ressaltam-se apenas quatro operações que utilizaram com sucesso e em escala operacional caminhões elétricos em subterrâneo: as minas Coleman-McCreedy (Canadá), Creighton (Canadá) e Stillwater (EUA) operaram caminhões elétricos do modelo Kiruna; enquanto a mina Kidd Creek (Canadá) operou caminhão elétrico modelo *trolley* INCO.

Entretanto, pode-se dizer que a partir de meados de 2010 a temática de adoção de frota elétrica em larga escala em mina subterrânea voltou a ganhar destaque em publicações e estudos técnicos e corporativos, tais como Jacobs (2013), McCrae (2016), Kerai e Halim (2013), Proactive Investors (2013) e Varaschin (2016).

A retomada de interesse no desenvolvimento e de aplicação desta tecnologia pode ser creditada, especialmente, aos fatores abaixo:

- Evolução tecnológica na durabilidade e no armazenamento de energia em baterias;
- Desenvolvimento e aperfeiçoamento de séries/famílias elétricas de equipamentos subterrâneos por parte dos construtores (tradicionais ou *startups*);
 - “Caterpillar anuncia primeira LHD elétrica à bateria” (KAJASTIE, 2019)

- “Sandvik anuncia *Dozer* elétrico à bateria para operações subterrâneas” (SMALL, 2016).
- “Série elétrica EV da MacLean serão aplicadas no desenvolvimento da primeira mina de rocha dura (*hard rock mine*) 100% livre de diesel no mundo” (LISTER, 2016).
- “Atlas Copco compromissada com uma mineração subterrânea com zero emissão e focada no desenvolvimento de equipamentos elétricos à bateria” (EPIROC, 2017)
- Pressões dos órgãos regulatórios para melhoria das condições de saúde ocupacional em ambiente subterrâneo;
 - Agência Internacional de Pesquisa do Câncer da ONU aponta grande potencial cancerígeno de trabalhadores de minas subterrâneas submetidos à exposição de emissões de motores à combustão diesel. (IARC, 2012)
- Necessidade de promover uma melhor imagem (Mineração 4.0 , Responsabilidade socioambiental) do setor mineral à sociedade para continuidade ou ampliação de operações (“licença social”);
 - Emissão de gases estufa contribui para o não licenciamento de um projeto de mineração de carvão na Austrália sob a argumentação jurídica de uma atividade “social e ambientalmente não amigável” (SHANNON et al, 2019)
 - Assinatura do Protocolo Brasileiro de Redução de Gases estufa (GHG Brazil Protocol) apresenta adesão de mineradoras. (FRANSEN, 2008)
- Incentivos fiscais ofertados por órgãos governamentais e/ou instituições de fomento tecnológico na adoção de políticas ambientalmente menos agressivas;
 - Governo do Canadá oferece à mineradora Goldcorp Inc. 5 milhões de dólares como prêmio por inovação pela mina 100% elétrica de Borden. (JAMASMIE, 2018)
- Incertezas quanto à disponibilidade e preço de combustíveis fósseis (ex.: diesel);

- Imposições ambientais impostas por grandes fundos e bancos de investimento financiadores dos empreendimentos.
 - Gestores de Fundos de Investimento estão abdicando de injetar capital em algumas companhias mineradoras devido à incerteza do *case* de negócio em razão de pressões sociais-regulatórias-ambientais (SHEPPARD, 2019)

5.2. Aplicações recentes e motivações

Os demonstrativos mais recentes de que a eletrificação total de frota subterrânea pode e deve ganhar espaço abrangente em um futuro muito próximo são as notícias de que dois projetos mineiros foram recentemente implantados na modalidade “livre de diesel” / “totalmente elétrica”. Ambas as operações estão situadas em Ontario, Canadá: Macassa Mine (Kirkland Lake Gold Company, implementada em 2015; produção de ouro 220 mil Oz em 2018 com expectativa para 400 mil Oz em 2022) e Borden Mine (Goldcorp Inc., implementada em 2018 com produção de ouro estimada em 2kOz/dia e LOM (*Life-of-Mine*) de 9 anos).

Devem-se ressaltar dois aspectos para a vanguarda desta modalidade de empreendimento mineiro nas operações citadas:

- O incentivo governamental no desenvolvimento desta modalidade de produção → Há relatos de projetos em estudo/curso de implantação em outras unidades produtivas somente no Canadá, tais como um projeto no estado de Sudbury (VALE & Glencore) e outro no estado de Quebec (Nouveau Monde Graphite Inc.) segundo publicação de Taylor (2019).
- A parceria mina-indústria no desenvolvimento e maturação tecnológica de frota elétrica:
 - Sinergia da mineradora Kirkland Lake Gold Company com a construtora de equipamentos EPIROC (GLEESON, 2018);
 - Parceria entre a mineradora Goldcorp Inc. e as fabricantes Sandvik e MacLean (CMJ, 2018).

Em todos os projetos (implementados ou em estudo), excluindo-se os benefícios ambientais e de saúde ocupacional, o fator mais evocado como grande vantagem competitiva na adoção desta nova modalidade produtiva são os ganhos com o redimensionamento da infraestrutura (CAPEX) e energéticos (OPEX) do sistema de ventilação subterrânea.

Relatórios corporativos, estudos técnicos e notícias em revistas especializadas apontam:

- Mina Macassa:
 - Aumento de apenas 2°C na frente de lavra em operação 100% elétrica contra 8°C em operação à diesel (GLEESON, 2018);
- Mina Borden:
 - Redução de 33 kW de demanda energética no circuito de ventilação (redução de OPEX da ordem de US\$ 9 milhões/ano). (HIYATE, 2019)
 - Redução na emissão de calor da ordem de 50% (JONCAS, 2017).

Diante do exposto até então, fica comprovada a relevância da temática de uma mineração subterrânea *diesel-free* e *all-electric* (conforme estudos e aplicações existentes ao menos desde a década de 1980) e uma aparente atratividade tecnológica-operacional (ressaltada pela implementação atual de projetos de grande escala) com grande impacto no sistema de ventilação. Entretanto, no decorrer do desenvolvimento deste trabalho, não foram encontrados relatos de aplicação em escala ou estudo deste tema em operações mineiras no Brasil.

Nossos pares sul-americanos já se movimentam em direção a esta tecnologia, conforme informações obtidas de implantação em escala de prova e planejamento de aquisições de veículos elétricos à bateria no Chile (Mina El Teniente da Codelco Corp.), incluindo LHD, plataformas, ônibus, VL's de equipe operação conforme anunciado por Minería (2019).

Portanto, este trabalho tem por objetivo estudar um caso de implementação de frota 100% elétrica em uma mina subterrânea na realidade brasileira, buscando-se validar ou não sua viabilidade de implementação. Para tal, a metodologia de estudo a ser adotada será baseada no trabalho desenvolvido por Varaschin (2016).

6. METODOLOGIA PARA MODELAGEM DE FROTA ELÉTRICA

6.1. Eficiência energética e emissão de calor

No trabalho desenvolvido por Varaschin (2016), o primeiro aspecto a ser considerado no comparativo de desempenho entre veículos à diesel e elétricos é a eficiência energética.

Admite-se, termodinamicamente, que a eficiência de um processo (um motor) é a razão entre a energia por ele entregue ao sistema (output, ou energia disponibilizada para trabalho útil) e a energia inicialmente a ele ofertada (input, ou a energia contida no combustível). A diferença entre estes valores corresponde aos mecanismos de perda de energia do sistema, com destaque para calor, ruído e atrito mecânico.

$$n = \frac{\text{Power Output}}{\text{Fuel Energy Input}} = \frac{\text{energia entregue como trabalho útil}}{\text{energia do combustível}} \quad (1)$$

Motores à combustão interna, usualmente apresentam eficiência energética “n” da ordem de 30 a 40%. Para determinar-se mais precisamente um valor aplicável a equipamentos pesados de mineração, Varaschin (2016) utiliza-se de informações de fabricante do motor do caminhão Caterpillar AD45B, operando à 1800 rpm, para afirmar um n igual a 37%.

De acordo com dados do US Department of Energy (1997) *apud* Varaschin (2016), motores elétricos são conhecidos por sua maior eficiência energética, sendo indicado pelo autor uma faixa entre 90 a 94%. Tomando-se um comparativo alusivo ao caminhão a diesel, na mesma condição operacional (1800 rpm) pode-se estimar n = 92% para motores elétricos.

McPherson (1993) *apud* Varaschin (2016) aponta que em última instância, para uma abordagem conservadora, toda energia consumida por um equipamento é convertida em calor, exceto àquela utilizada para realizar trabalho contra a gravidade ou convertida em energia potencial. Portanto, a partir da equação (1) tem-se que:

$$H = \frac{W}{n} = \frac{\text{brake power (energia útil entregue)}}{\text{eficiência térmica}} \quad (2)$$

Onde: H = calor emitido = energia do combustível.

Partindo-se do pressuposto de que ambos os tipos de equipamentos necessitam o mesmo *brake power* (energia entregue pelo motor pronta para aplicação) para desempenhar uma mesma atividade (ou seja, as perdas dos subsistemas elétricos e mecânicos dos dois tipos de equipamentos são assumidas iguais) pode-se então dizer que $W_{\text{elétrico}} = W_{\text{diesel}}$, e portanto a equação (2) nos informa:

$$H_{\text{elétrico}} = \frac{n_{\text{diesel}}}{n_{\text{elétrico}}} * (H_{\text{elétrico}}) \quad (3)$$

Aplicando-se na equação (3) os índices de eficiência térmica discutidos no início desta seção ($n_{\text{diesel}} = 0,37$ e $n_{\text{elétrico}} = 0,92$) tem-se que: equipamentos elétricos emitem cerca de 40% do calor emitido por equipamentos a diesel para desempenhar a mesma tarefa (kW). Ou seja, potencial nominal de redução de 60% da demanda de ar por calor.

Embora seja uma abordagem teórica, é suficientemente razoável para uma primeira análise. Quando consultadas especificações técnicas de fabricantes, e em Jaderblom (2017) encontra-se que uma LHD elétrica da Sandvik produz até 80% menos calor que uma tradicional a diesel de mesma capacidade. Já para caminhões, verifica-se no site da fabricante que o modelo elétrico à bateria Artisan/Sandvik Z40 produz 1/8 (redução de 85%) do calor gerado por semelhante a diesel.

Estes dados ilustram um potencial de redução da demanda de ventilação por calor da ordem de 80%, ou seja, elétricos emitiriam cerca de 20% do calor de um diesel. Entretanto, estes números são baseados na capacidade nominal dos equipamentos (toneladas) e não incluem fatores operacionais tais como tempo de ciclo, velocidade de transporte, *load factor*, etc. que podem impactar no número de equipamentos necessários para atingir a produção desejada.

No próprio catálogo dos fabricantes pode-se verificar que embora elétricos tenham melhor desempenho de carga (conseguem trabalhar mais facilmente em *overload* devido ao torque responsivo), sua velocidade de transporte é ligeiramente menor comparada aos modelos diesel. Para LHD (percorrem curtas distâncias) este fato não se mostra muito relevante, mas para caminhões isto pode ser significativo.

Por esta razão, será considerado o potencial nominal de redução calculado termodinamicamente (elétrico emite 40% do calor de um diesel, redução de 60%).

Ressalta-se que para uma abordagem mais refinada e realística, sugere-se utilizar dados médios de consumo de combustível (diesel e energia elétrica) de ambos os tipos equipamentos durante um turno desempenhando as mesmas atividades. Desta forma, consegue-se captar discrepâncias entre o desempenho dos subsistemas dos equipamentos e também quanto a fatores operacionais (*load factor*, utilização).

6.2. Demanda de ar no cenário elétrico

O segundo aspecto a ser analisado é se uma potencial redução da demanda de ventilação em função da implementação de frota elétrica (até o limite de 60% calculado acima) resultaria em uma ventilação deficiente perante outros fatores que norteiam o propósito da ventilação.

Conforme abordado acima, a ventilação subterrânea destina-se a diluir ou remover os seguintes contaminantes:

- Poeira, sílica;
- DPM e gases tóxicos de motores à combustão;
- Calor;
- Gases de desmonte

Veículos elétricos não emitem DPM e gases de combustão, logo este fator demandante de ventilação não seria mais uma preocupação no dimensionamento de circuitos.

Estudos conduzidos por Stinnette (2013), conforme Tabela 6.1, demonstraram que a poeira / sílica produzida nas operações (sobretudo pela circulação de veículos, operações de carga-descarga, após desmonte por explosivos) podem representar uma demanda de ar significativa (ex: 32,5 m³/s), sendo superior até mesmo aos parâmetros regulatórios (ex: 0,06 m³/s/kWh * 285Kw = 17,1 m³/s).

Entretanto, o próprio autor ressalta que este fator não é usualmente considerado no dimensionamento de circuitos de ventilação, pois é algo comumente e facilmente mitigado com a umidificação das frentes de lavra após desmonte e práticas operacionais de controle da velocidade de ventilação.

Tabela 6.1: Comparação entre métodos para cálculo da demanda de ventilação requerida para LHD Sandvik LH517 de 285 Kw – (STINNETTE, 2013)

Método para determinar vazão de ar	Vazão de ar total (m³/s)	Demanda por ventilação (m³/s / kW)	% em relação ao maior valor de demanda
<i>Direct Engine Testing</i> (*)	5,9	0,021	18%
Derivação Empírica	18,0	0,063	55%
Método proposto: Gases	8,0	0,028	25%
Método proposto: DPM	3,1	0,011	10%
Método proposto: Calor	21,4	0,075	66%
Método proposto: Poeira	32,5	N/A	100%

(*) NRCan, 2011

Portanto, restam dois fatores demandantes de ventilação que permanecem relevantes na mudança de modal energético: calor e gases de desmonte.

Pela abordagem de eficiência energética, sustenta-se que a adoção de frota elétrica exige cerca de 40% da demanda atual de ventilação para dissipação de calor. Resta saber então se uma redução a este nível é suficiente para assegurar a diluição/remoção de gases de desmonte.

No mesmo estudo de Stinnette (2013), conforme Tabela 6.1, é sustentado que a demanda de ar para diluição de gases de desmonte (0,028 m³/s/kWh) é cerca de 1/3 daquela necessária para dissipação de calor (0,075 m³/s/kWh para temperatura limite de 20° C). Admitindo-se a redução da demanda por calor em 60%, tem-se uma vazão de ar estimada de 0,03 m³/s/kWh. Trata-se de um valor muito próximo ao necessário para dissipação de gases de desmonte.

Embora se trate de estudos pontuais, logo para cada mina há uma especificidade de níveis de contaminantes gasosos, pode-se admitir em uma primeira abordagem que com uma redução de 60% não há margem segura para dispersar corretamente os gases do desmonte. Será então adotada uma redução de 40%, pois com uma vazão de 0,045m³/s/kWh o autor considera suficientemente seguro para garantir a dissipação de gases de desmonte (0,028 m³/s/kWh).

Entretanto, outro aspecto a ser considerado sobre o desmonte é o potencial impacto que a redução da velocidade de ar (comandada pela redução em vazão devido à menor emissão de calor) poderia trazer ao tempo de limpeza/carreamento de gases da frente de lavra (*clearance time*).

Stewart (2014) *apud* Varaschin (2016) correlaciona *clearance time* como inversamente proporcional à vazão em ordem exponencial, conforme Figura 6.1 Verifica-se que para uma galeria padrão 5,5 x 5,5 m (30,25m²), com fator de diluição usual ($f_d = 0,35$) e sob condições de ventilação normais (100% da vazão estipulada) tem-se um *clearance time* médio de 21 minutos. Uma redução de 40% da vazão de ventilação (governada pela redução da emissão de calor) resultaria, pelo estudo, em um *clearance time* de cerca de 35 minutos.

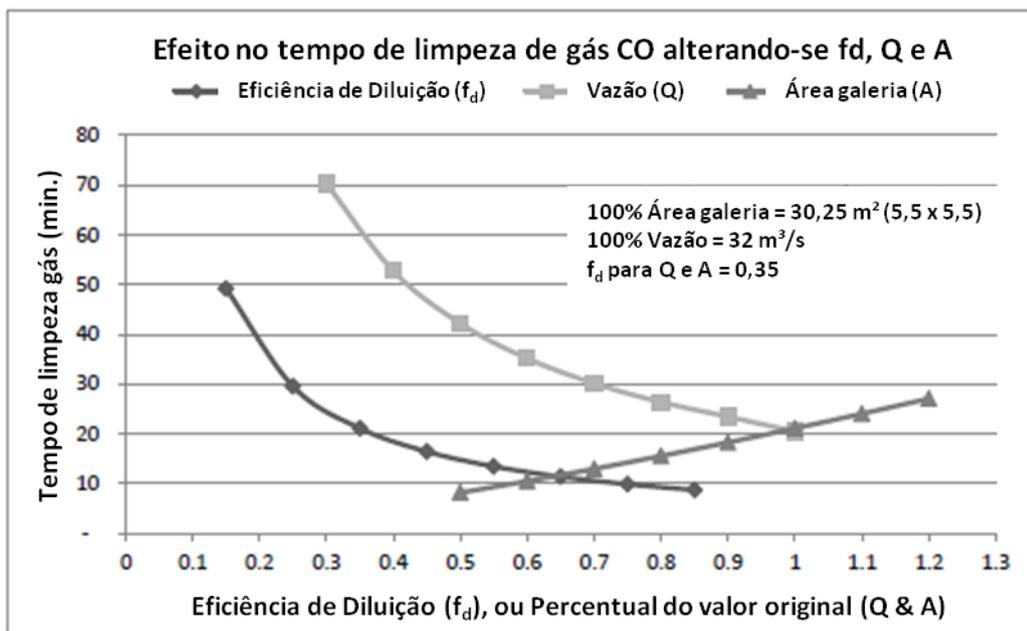


Figura 6.1: Comportamento do tempo de limpeza (*clearance*) em múltiplos de uma vazão (Q), fator de diluição (f_d) e área da galeria (A) – (VARASCHIN, 2016)

Considerando-se que em minas subterrâneas a boa prática de segurança determina desmontes somente em trocas de turnos (ausência de pessoal nas frentes, redução de risco) e que estas trocas usualmente duram cerca de 30 a 40 minutos (tempo de descida e de acesso à frente de lavra), pode-se dizer que o incremento em *clearance time* resultante da redução da vazão de ar não resultaria em um impacto significativo na operação de mina.

Portanto, em uma abordagem geral e primária, é razoável consentir que a adoção de frota de mina totalmente elétrica permite que a vazão de ar dos circuitos de ventilação seja governada pela demanda em calor dos equipamentos. Pode-se ainda dizer que uma redução da vazão em 40% assegura satisfatoriamente a segurança (gases de desmonte) e o baixo impacto no ciclo operacional.

Considerando o múltiplo regulatório mais comumente empregado no mundo para vazão de ar regido por equipamentos a diesel ($0,06 \text{ m}^3/\text{s/kWh}$), esta redução representaria um múltiplo de $0,036 \text{ m}^3/\text{s/kWh}$, constituindo uma infração à norma. No caso da legislação brasileira ($0,08 \text{ m}^3/\text{s/kWh}$), o novo valor seria de $0,048 \text{ m}^3/\text{s/kWh}$, também configurando uma infração. Estes dois casos reafirmam a necessidade de revisão da norma adaptada à esta nova tecnologia.

Resta analisar, então, os impactos na infraestrutura de ventilação (OPEX e CAPEX) em um caso prático.

7. ESTUDO DE CASO – IMPLEMENTAÇÃO DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E INFLUÊNCIA NO SISTEMA DE VENTILAÇÃO

Como atividade final deste trabalho, buscou-se avaliar o potencial impacto que a adoção de frota elétrica representaria em uma mina nas condições brasileiras.

Em uma análise macro, foi considerada uma mineração de ouro já em produção e localizada no estado de Minas Gerais. Os dados aqui apresentados foram obtidos majoritariamente do trabalho desenvolvido por Machado (2011) e Seixas (2007), sendo atualizados através de pesquisa em Internet (Relatórios Anuais, Apresentações públicas e Seminários) e comunicação pessoal. Embora possam não refletir com total exatidão o cenário produtivo atual, tratam-se de valores que guardam sua ordem de grandeza e princípios de projeto de engenharia.

Tabela 7.1: Dados gerais sobre escala de produção Mina X

Mina X	
Localização	Minas Gerais - Brasil
Produção	1,3 Mtpa (Minério)
	280 kOz/ano
Dias trabalhados	341
Nº de turnos	4
Horas trabalhadas / turno	4,8
Horas programadas / ano	6547

Nesta mina, até meados de 2005 o sistema de ventilação estava dimensionado (400 m³/s) para uma produção anual de 0,8 Mtpa (nível mais profundo à 600m da superfície). Com a expansão das atividades, incluso aprofundamento (nível mais profundo à cerca de 1300 m da superfície), fora necessário redimensionar o sistema de ventilação para uma produção aproximada de 1,3 Mtpa.

O sistema de ventilação atual pode ser visto esquematicamente na Figura 7.1. Ele é dimensionado para uma vazão nominal de 935 m³/s, conforme Tabela 7.2, e seus circuitos de adução e exaustão constituem-se das seguintes estruturas:

- Adução do ar:
 - Rampa principal de acesso à mina (Nível 03);
 - Chaminé (3,0 m diâmetro);
 - Poço principal (6,0 m diâmetro);
 - Poço de refrigeração (5,1 m de diâmetro - N11 à superfície).
- Exaustão:
 - Sistema 2 → três chaminés (diâmetro 2,4m)
 - Sistema 3 → uma chaminé (diâmetro 4,8m – N11 à superfície)
 - Sistema 4 → uma chaminé (diâmetro 4,0m)

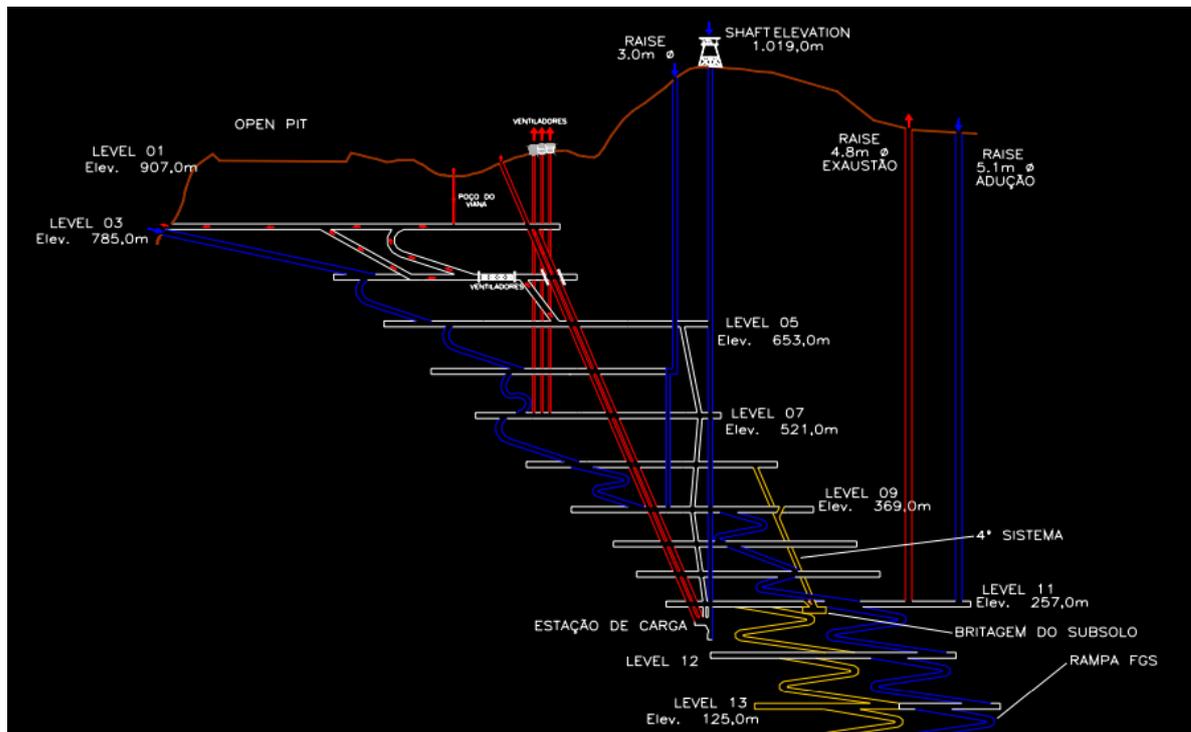


Figura 7.1: Ventilação da Mina X (Adução: azul / Exaustão: vermelho) – (SEIXAS, 2007)

Tabela 7.2: Capacidade nominal dos sistemas de ventilação da Mina X

MINA X						
VENTILADORES PRINCIPAIS - CAPACIDADE NOMINAL INSTALADA						
Sistema	Nº Ventiladores	Dados Unitários dos Ventiladores				Vazão Total (m ³ /s)
		Potência (HP)	Vazão de Ar (m ³ /s)	Pressão (KPa)	% RPM	
SV02	3	1000	90	6,6	80%	270
SV03	3	1600	133	6,6	85%	399
SV04	2	1600	133	6,6	85%	266
VAZÃO TOTAL INSTALADA						935

Conforme Figura 7.2, o ar fresco é fornecido às frentes de lavra/realces a partir das rampas principais e travessas de acesso (podem-se utilizar sistemas auxiliares ou chaminés de exaustão). O ar viciado conta com um conjunto de chaminés entre níveis que se conectam aos sistemas principais de exaustão (SV 2, 3, 4). A refrigeração é feita a partir do nível 11, local onde o poço de refrigeração (planta na superfície) se conecta com o circuito de ventilação.

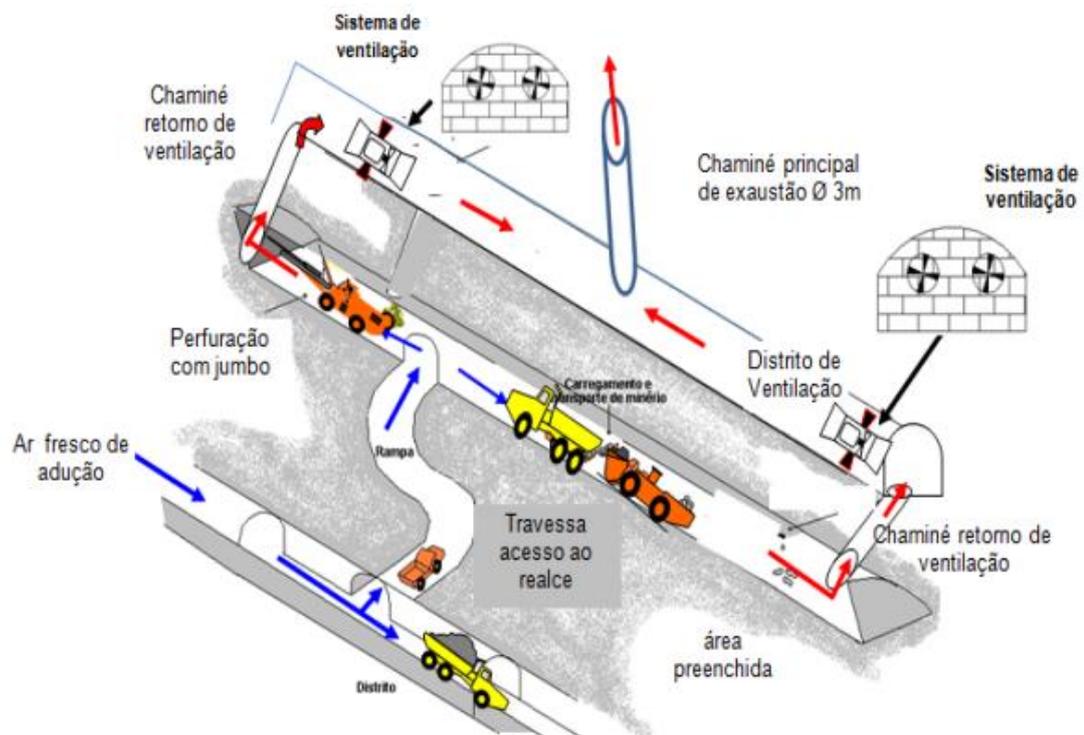


Figura 7.2: Layout da ventilação nas frentes de lavra da Mina X – (MACHADO, 2011)

Segundo relato em comunicado pessoal, a vazão nominal do sistema de ventilação é de 935 m³/s e fora definida principalmente a partir da análise da demanda dos equipamentos a diesel e quantidade de homens no subsolo.

O trabalho de Machado (2011) corrobora com esta informação ao calcular a demanda de ventilação para os demais fatores que são normatizados pela NRM-06 (demanda por explosivo e demanda por massa desmontada) e verificar que estes são bem inferiores à demanda por equipamentos a diesel. Portanto será a demanda por equipamento a diesel o foco deste trabalho.

Atualmente, a frota dimensionada para se atingir a produção desejada (1,3 Mtpa ou 3600 tpd) pode ser verificada na Tabela 7.3. Os dados foram inicialmente obtidos em Machado (2011) e atualizados via comunicação pessoal e via catálogo de fabricantes.

Tabela 7.3: Listagem de equipamentos e da potência instalada na Mina X

Frota da Mina X - 2018						
Equipamento / Modelo		Quantidade	Nominal (kW)	Total (kW)	Utilização (%)	
Frota Produção	LHD	R1700	7	257	1.799	80
		R2900	2	305	610	80
		L90F	6	122	732	80
	Truck	AD30	6	305	1.830	80
		AD45	8	408	3.264	80
		A30F	2	265	530	80
<i>Potência Total - Produção (kW)</i>				8.765	7.012	
Frota Auxiliar	Scaler	Dux	4	115	460	50
	Jumbo	DD320/21	7	135	945	50
	Fandril	DL4217C	8	120	960	50
	Bolt	DS311C	2	110	220	50
	Plataforma	Normet	10	90	900	50
	Shotcrete	6050W	4	96	384	50
	Prep. Concreto	LF600	4	155	620	50
	Niveladora	120K	2	104	208	50
	VL's	Toyota	10	76	760	50
<i>Potência Total - Auxiliar (kW)</i>				5.457	2.729	
Potência TOTAL (kW)					9.741	

Admitindo-se o fator múltiplo da legislação brasileira que normatiza o cálculo da demanda de ventilação por frota a diesel (0,08 m³/s/kW), e considerando a potência a diesel total da mina, temos uma demanda de ar aproximada de **780 m³/s**.

No trabalho de Machado (2011) tem-se a informação de que a oficina (nível 11) e o sistema de britagem primário requisitam 35 m³/s de ventilação cada um. Portanto, em regime total de produção, resguardadas perdas no circuito (10%), tem-se a demanda por ventilação de **935 m³/s** (ver Tabela 7.4). Valor este coerente com o nominalmente dimensionado para o circuito.

Tabela 7.4: Distribuição da vazão de ar primária da Mina X

Local	Vazão (m³/s)
Operações (Lavra e Desenvolvimento)	780
Oficina subsolo	35
Britagem	35
Perdas no circuito (10%)	85
Total	935

Em simulação computacional, buscando replicar o perfil de produção (frentes de lavra e desenvolvimento por ciclo) e as características locais da mina (perfil geotérmico, autocompressão, fricção, etc.) Machado (2011) obteve resultados de vazão de ar muito próximos com os cálculos legislatórios por demanda a diesel, incluindo um cenário que apresenta a escala de produção atual da mina (3600 tpd). Portanto, para fins de simplificação, será adotado como satisfatório os valores aqui demonstrados.

Analisando-se a frota de equipamentos da Mina X, verifica-se que a quase totalidade dos equipamentos é movido a diesel (exceto alguns casos de Jumbos/Fandrill que apresentam alguma unidade motriz elétrica). Serão analisados dois cenários de eletrificação destes equipamentos: o primeiro abordará somente a eletrificação dos equipamentos de produção e o segundo uma eletrificação total dos equipamentos (produção e auxiliares).

Para buscar-se avaliar os potenciais impactos econômicos na ventilação, será realizada uma análise com base na demanda de ventilação estimada (m³/s). A metodologia mais correta seria redimensionar a potência instalada dos ventiladores (em kW, principais e secundários) para a

nova demanda de ventilação, entretanto isto demandaria um estudo específico com simulação das condições da mina para uma maior assertividade.

Em ambos os cenários, consolidados na Tabela 7.5, foi aplicado um fator de redução de 40% (multiplicador 0,6) no cálculo de demanda por ventilação por veículos a diesel (vazão em m³/s), conforme discutido em análise de emissão de calor no capítulo anterior.

De acordo com dados ABB Inc. (2011), o custo médio operacional (OPEX) de um sistema de ventilação é da ordem de 5,75 US\$/ano/CFM. Convertidas as unidades, tem-se o valor aproximado de 12.185,00 US\$/ano/m³/s (admitindo-se uma operação anual do sistema sem interrupções, 365 dias x 24 horas). Quando aplicado este valor ao cenário base (100% Diesel), verifica-se uma boa correlação do custo de ventilação calculado aqui e aquele estimado por Machado (2011) em simulação com dados reais da mina, validando esta consideração.

O consumo dos equipamentos diesel foi estimado com base em normativas de catálogo do fabricante, Caterpillar Inc. (2011) ou estudos na literatura Bascompta (2016) para uma operação de consumo moderada. O consumo dos equipamentos elétricos foi estimado com base no trabalho de Kerai e Halim (2013), estipulando que equipamentos elétricos apresentam 70% da potência nominal de um similar a diesel. As horas trabalhadas planejadas foram corrigidas pela utilização, para cada caso.

Os custos do óleo diesel e da eletricidade foram obtidos em consulta à índices históricos, em valor dolarizado, segundo Firjan (2017) e Global Petrol Prices (2019).

O custo global de operação (OPEX) foi obtido somando-se os custos de ventilação com os de combustível. Todos os demais custos que poderiam compor o OPEX foram considerados iguais entre os cenários, inclusive o de manutenção. Ressalta-se que o comparativo de manutenção entre equipamentos elétricos e a diesel é um fator de grande divergência na literatura, podendo ser alvo de detalhamento posterior com o amadurecimento e aplicação em escala da tecnologia elétrica à bateria.

A emissão de CO₂ foi estimada com base no consumo de diesel, segundo cálculo termodinâmico da queima deste combustível, de acordo com EPA (2005).

Tabela 7.5: Comparativo de cenários da Mina X com adoção de frota elétrica

	Modalidade Energética – Frota		
	100% Diesel	Produção Elétrica	100% Elétrica
Ventilação			
Vazão requerida (m³/s)	934	687	591
Diesel	779	555	468
Produção	561	337	337
Auxiliar	218	218	131
Oficina	35	35	35
Britagem	35	35	35
Ventilação Total (M\$/ano) ⁽¹⁾	\$ 11,38	\$ 8,37	\$ 7,20
Combustível			
Diesel (ML)	8,5	2,3	0,0
LHD - (30L/h) ⁽²⁾	2,4	-	-
Truck - (45L/h) ⁽²⁾	3,8	-	-
Auxiliar - (14L/h) ⁽³⁾	2,3	2,3	-
Energia elétrica (GWh) ⁽⁴⁾	0,0	32,1	44,6
LHD - (70% Nominal Diesel)	-	11,5	11,5
Truck - (70% Nominal Diesel)	-	20,6	20,6
Auxiliar - (70% Nominal Diesel)	-	-	12,5
Combustível Total (M\$/ano)	\$ 8,04	\$ 5,43	\$ 4,46
Diesel (0,95\$/L) ⁽⁵⁾	\$ 8,04	\$ 2,22	\$ -
Eletricidade (0,1 \$/kWh) ⁽⁶⁾	\$ -	\$ 3,21	\$ 4,46
OPEX (M\$/ano) Excluso Manutenção	\$ 19,42	\$ 13,81	\$ 11,67
		-29%	-40%
Emissão CO₂ (Kton) ⁽⁷⁾	22,6	6,2	0,0
		-72%	-100%

(1) Custo de 5,75 \$/ano/cfm ou 12.185,00 \$/ano/m³/s - ABB Inc. (2011)

(2) Consumos em regime operacional médio – Caterpillar Inc. (2011)

(3) Consumo padrão para equipamentos auxiliares – Bascompta (2016)

(4) Equivalência da potência nominal entre motor elétrico e a diesel – Kerai e Halim (2013)

(5) Preço médio do diesel no Brasil - GlobalPetrolPrices (2019)

(6) Preço médio da eletricidade industrial no Brasil - FIRJAN (2017)

(7) 2,67 Kg de CO₂ emitido pela queima de 1,0L de diesel - EPA (2005)

8. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES

A eletrificação de equipamentos de mineração para atividade subterrânea já se apresenta como uma realidade no setor. Em um cenário econômico onde as atividades industriais, sobretudo o setor mineral, estão cada vez mais pressionadas por melhores margens financeiras e por práticas trabalhistas e ambientalmente responsáveis, a aplicação desta tecnologia em substituição ao diesel desponta como promissora. Seus principais benefícios são: redução de emissões de gases estufa (ex: CO₂), redução de consumo energético e da demanda de ventilação devido à menor emissão de calor, elimina exposição aos particulados diesel com potencial cancerígeno.

Embora não esteja completamente pronta para aplicação em larga escala, acredita-se que nos próximos anos o amadurecimento tecnológico com enfoque nas baterias (restrições quanto ao peso, tempo de recarga e vida útil) irão alavancar novos e atuais projetos de mineração subterrânea 100% elétrica.

Os estudos teóricos e iniciativas de aplicação industrial de uma mina 100% elétrica referenciados neste trabalho são majoritariamente de origem Canadense, verificando-se pouca ou nenhuma referência na literatura brasileira. Em geral, todos apresentam uma aparente viabilidade de aplicação da tecnologia, resguardado um aspecto de grande importância: a necessidade de se discutir uma revisão de parâmetros regulatórios de ventilação subterrânea, ainda baseados na tecnologia a diesel.

Os resultados obtidos com o estudo de caso de uma mina no Brasil, ainda que em uma análise de dados macro, demonstraram o interesse econômico da implementação de frota totalmente elétrica em subterrâneo no cenário nacional. Para uma redução em 40% da demanda de ventilação, pode-se verificar uma redução potencial de até 40% em custos operacionais e redução de até 100% na emissão de CO₂, aparentemente sem prejuízos às condições de saúde e segurança operacionais.

Além de potenciais benefícios financeiros, verifica-se o potencial benefício ambiental com a redução na emissão de gases GHG e de saúde com a exclusão de DPM. Estes fatores podem ainda favorecer a obtenção de licenças para a atividade mineradora perante a sociedade.

Para uma análise mais detalhada e precisa sobre o assunto, recomenda-se como pontos de melhoria e desenvolvimento para trabalhos futuros:

- Quantificação da emissão de calor:
 - Realizar medidas de calor emitido in loco para equipamentos de porte semelhante (Diesel vs. Elétrico);
 - Quantificar a contribuição das demais fontes de calor (rocha, autocompressão, etc).

- Modelagem do potencial de redução da demanda de ventilação (m^3/s) com adoção de equipamentos elétricos → Utilizar dados históricos de consumo de combustível de equipamentos a diesel e elétricos desempenhando mesma tarefa (condições reais de performance operacional).

- Simulação computacional (ex: Ventsim) → avaliar a redução de vazão de ar devido à mudança de modal energético dos equipamentos, respeitadas as condições específicas da mina (ex: resistência, ciclo de produção, estruturas de ventilação e sistemas secundários, vazões de ar para gases de desmonte).

- Análise financeira completa:
 - Avaliar o custo de aquisição de ambas as modalidades de equipamento (CAPEX);
 - Avaliar o custo de aquisição de estruturas de ventilação em caso de redimensionamento do sistema com redução da vazão e de expansão do sistema elétrico para recarga (CAPEX);
 - Refinar o custo operacional (OPEX) com comparativo de manutenção, mão de obra, etc.

- Revisão do múltiplo de ventilação normativo ($\text{m}^3/\text{s}/\text{kWh}$) aplicável aos equipamentos no cenário elétrico → Considerar não apenas o potencial de redução devido ao calor (m^3/s), mas também adequação do múltiplo quanto à potência instalada dos equipamentos (Kerai e Halim (2013) assumem que equipamentos elétricos necessitem de apenas 70% da potência instalada diesel em kWh).

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABB Inc. Underground Electric Haulage Trucks: Introduction and Benefits. In: XVI Annual MDEC Conference, Julho 2011, Toronto – Canada. Disponível em: <http://mdec.ca/2010/S3P3_willick.pdf>. Acesso em: 16/06/2019.

BASCOMPTA, M. et al . *Heat flow assessment in an underground mine: An approach to improve the environmental conditions*. Dyna rev.fac.nac.minas, Medellín , v. 83, n. 197, p. 174-179, Junho 2016. Disponível e m: < http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532016000300023 >. Acesso em: 16/06/2019.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 15** - Atividades e Operações Insalubres. 1978. Disponível em: <http://www.trtsp.jus.br/geral/tribunal2/LEGIS/CLT/NRs/NR_15.html>. Acesso em: 20/04/2019.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 22** – Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração. 1978. Disponível em: < http://www.trtsp.jus.br/geral/tribunal2/LEGIS/CLT/NRs/NR_22.html>. Acesso em: 20/04/2019.

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **NRM 06** - Ventilação. 2015. Disponível em: <https://www.dnpm-pe.gov.br/Legisla/nrm_06.htm>. Acesso em: 20/04/2019.

CATERPILLAR Inc. *Estimating Owning and Operating Costs*. In: *Caterpillar Performance Handbook*. 41 ed. Illinois, EUA: Catterpillar Inc., 2011. Cap. 20, p. 1285. Disponível em: <<https://www.holtcat.com/Documents/PDFs/2012PerformanceHandbook/Edition%2041%20Full.pdf>> . Acesso em : 08/06/2019.

CMJ. *Part II of our electric mines series: Goldcorp's vision for Borden*. *Canadian Mining Journal*, 1 de Outubro 2018. Interview and Technology. Disponível em: < <http://www.canadianminingjournal.com/features/part-ii-of-our-electric-mines-series-goldcorps-vision-for-borden/> >. Acesso em: 08/06/2019.

EMILSSON H. *A eletricidade ganha terreno*. *Solid Ground Sandvik*, 15 de Maio 2012. Disponível em: <<https://solidground.sandvik/pt-br/a-eletricidade-ganha-terreno/>>. Acesso em: 08/05/2019.

EPA. *Emission Facts: Average Carbon Dioxide Emissions Resulting from Gasoline and Diesel Fuel*. United States Environmental Protection Agency, Fevereiro 2005. EPA420-F-05-001. Disponível em: < <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P1001YTF.TXT> >. Acesso em: 16/06/2019.

EPIROC. *Atlas Copco targets zero-emission underground mining. Focus development on battery-driven machinery*. Epiroc News, 12 de Outubro 2017. Disponível em: < <https://www.epiroc.com/en-us/newsroom/2017/atlas-copco-targets-zero-emission-underground-mining-focus-development-on-battery-driven-machinery>>. Acesso em: 08/06/2019.

FIRJAN. *Quanto custa a energia elétrica para a indústria no Brasil?*. Publicações Sistema Firjan, Fevereiro 2017. Pesquisa e Estudos Socioeconômicos. Disponível em: <<https://www.firjan.com.br/publicacoes/publicacoes-de-economia/quanto-custa-a-energia-eletrica.htm>>. Acesso em: 08/06/2019.

FRANSEN T. *Brazil Launches Its GHG Protocol Program*. World Resources Institute. 12 de Maio 2008. Disponível em: <<https://www.wri.org/blog/2008/05/brazil-launches-its-ghg-protocol-program>>. Acesso em: 08/06/2019.

GLEESON D. *Epiroc and Kirkland Lake Gold leading the mine electrification race*. The International Mining, 14 de Novembro de 2018. Disponível em: <<https://im-mining.com/2018/11/14/epiroc-kirkland-lake-gold-leading-mine-electrification-race-riach-says/>>. Acesso em: 08/06/2019.

GlobalPetrolPrices. Brasil – Preços do gasóleo, 2019. Disponível em: <https://pt.globalpetrolprices.com/Brazil/diesel_prices/>. Acesso em: 12/06/2019

HARTMAN, H.L.; et al. *Mine Ventilation and air Conditioning*. 3 ed. Wiley Interscience, 1997. 730p.

HIYATE A. *Part III of our electric mines series: Collaboration key to innovation at Borden*. Canadian Mining Journal, 1 de Fevereiro 2019. Interview and Technology. Disponível em: <<http://www.canadianminingjournal.com/features/part-iii-of-our-electric-mines-series-collaboration-key-to-innovation-at-borden/>>. Acesso em: 08/06/2019.

IARC. *Diesel engine exhaust as carcinogenic*. World Health Organization, 12 de Junho 2012. Press Release nº 2013. Disponível em: <https://www.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/07/pr213_E.pdf>. Acesso em: 08/06/2019.

JACOBS, W. *Electric LHDs in Underground Hard Rock Mining: A Cost/Benefit Analysis*. Australia: University of Western Australia, 2013. 62p. (Monografia, Engenharia Mecânica e Química).

JADERBLOM, N. *From Diesel to Battery Power in Underground Mine: A Pilot Study of Diesel Free LHDs*. Lulea, Suécia: Lulea University of Technology, 2017. 49p. (Dissertação, Mestrado, Engenharia de Design Industrial).

JAMASMIE C. *Canada injects C\$5m into Goldcorp's Borden mine as prize for innovation*. Mining.com Magazine. 29 de Outubro 2018. Disponível em: <<http://www.mining.com/canada-injects-c5m-goldcorps-borden-mine-price-innovation/>>. Acesso em: 08/06/2019.

JEN TIEN, J. C. *Mine Ventilation Systems*. In: JEN TIEN, J. *Practical Mine Ventilation Engineering* 1ed. Colorado: Intertec Publishing, 1999. Cap. 9, p. 167-189.

JOHNSON, B. *Heat, Humidity and Air Conditionning*. In: HARTMAN, H. L.; et al. *SME Mining Engineering Handbook*. 2ed. Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. Littleton, 1992. Vol 1, Cap. 11.4, p. 1028-1039.

JONCAS, L. *Selection of Electric UG equipment – Borden Gold*. Apresentação Power Point, Novembro 2017, Quebec, Canadá. Goldcorp Inc. Disponível em: <ftp://ftp.mern.gouv.qc.ca/Public/Dc/...Mines.../10h30_Joncas.pdf>. Acesso em: 07/06/2019.

KAJASTIE, Nia. *Cat announces first battery-electric LHD*. Mining Magazine, 11 de Abril 2019. Underground Mining / Technology Innovation. Disponível em: <<https://www.miningmagazine.com/technology-innovation/news/1360821/cat-announces-first-battery-electric-lhd>>. Acesso em: 08/06/2019.

KASHNIKOV A. *Automatic Ventilation Control System*. Apresentação Power Point, 2016, Bielorrússia. Disponível em: <<https://www.slideshare.net/AlekseyKashnikov/automatic-mine-ventilation-control-system>>. Acesso em: 20/05/2019

KERAI M.; HALIM A. *Ventilation Requirement for Electric Vehicles in Underground Hard Rock Mines – A Conceptual Study*. In: Australia Mine Ventilation Conference, 2013, Adelaide.

LE ROUX, W. L.; et al. *Le Roux's notes on mine environmental control*. 4 ed. The mine Ventilation society of South Africa, 1990.

LISTER, S. *Maclean EV Series to support development of world's first 100% diesel-free hard rock mine*. MacLean Media News, Ontario, 20 de Setembro 2016. Disponível em: <<https://www.macleaneengineering.com/media-en/news/270-maclean-ev-series-to-support-development-of-world-s-first-100-diesel-free-hard-rock-mine>>. Acesso em: 08/06/2019.

MACHADO, H. G. *Gestão de Riscos em Minas Subterrâneas - Avaliação da Ventilação de Minas Profundas*. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2011. 172p. (Dissertação, Mestrado, Engenharia de Minas).

McCRAE, M. A. *How batteries are lowering the costs of underground mining*. MiningDOTcom, 12 de Maio 2012. Disponível em: <<https://www.mining.com/web/battery-technology-is-moving-incredibly-fast/>>. Acesso em: 08/06/2019

McPHERSON, M. J. *Subsurface Ventilation Engineering*. 1 ed. Londres: Chapman & Hall, 1993. 905p.

MINERIA C. *El Teniente apunta a electrificar completamente su operación*. Minería Chilena, 17 de Maio 2019. Electromovilidad. Disponível em: <<http://www.mch.cl/2019/05/17/el-teniente-apunta-a-electrificar-completamente-su-operacion/>>. Acesso em: 08/06/2019.

MOORE, P. *Mucking out*. In: International Mining, 2014, Maio, p.89-98

MOORE, P. *Plugging the Gap Underground*. In: Mining Magazine, 2010, Novembro, p.40-46

PARASZCZAK, J.; et al. *Electrification of Loaders and Trucks - A Step Towards More Sustainable Underground Mining*. In: Renewable Energy and Power Quality Journal, No 12, Abril 2014, Cordoba, Espanha. p. 81-86

PROACTIVE INVESTORS. *Kirkland Lake Gold puts to work new battery-operated technology underground to save capital investment*. Proactive Investors USA, 17 de Junho 2013. Mining News. Disponível em: <<https://www.proactiveinvestors.com/companies/news/95658/kirkland-lake-gold-puts-to-work-new-battery-operated-technology-underground-to-save-capital-investment-45072.html>>. Acesso em: 06/06/2019

RAMANI, R. V. *Mine Ventilation*. In: HARTMAN, H. L.; et al. *SME Mining Engineering Handbook*. 2ed. Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. Littleton, 1992. Vol 1, Cap. 11.6, p. 1052-1092.

SEIXAS, J. C. *Expansão da Mina Cuiabá*. In: IBRAM - Congresso Brasileiro de Mineração, 12º. Setembro 2012. Belo Horizonte, Brasil. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/700/784/00000967.pdf>>. Acesso em: 07/06/2019.

SHANNON N. et al. *Wrong place at the wrong time: greenhouse gas emissions contribute to coal mine refusal*. Norton Rose Fulbright, 12 de Fevereiro 2019. Disponível em: <<https://www.nortonrosefulbright.com/en/knowledge/publications/1e16d63a/greenhouse-gas-emissions-contribute-to-coal-mine-refusal>>. Acesso em: 08/06/2019.

SHEPPARD D. *Hedge fund forecasts demise of coal in Europe within 3 years*. The Financial Times, Londres, 22 de Fevereiro 2019. Disponível em: <<https://www.ft.com/content/c1187c80-35f9-11e9-bb0c-42459962a812>>. Acesso em: 08/06/2019.

SMALL, J. P. *Sandvik launches battery-powered dozer*. Sandvik Solid Ground, 17 de Novembro 2016. Disponível em: <<https://solidground.sandvik/sandvik-launches-battery-powered-dozer/>>. Acesso em: 08/06/2019.

STINETTE, J. D. *Establishing Total Airflow Requirements for Underground Metal/Nonmetal Mines based on the Diesel Equipment Fleet*. Kingston: Queen's University, 2013. 251p. (Dissertação, Mestrado, Engenharia de Minas).

TAYLOR S. *First new all-electric mine dumps diesel; cuts costs, pollution*. Reuters News, Ontario, 21 de Junho 2018. Environment. Disponível em: <<https://uk.reuters.com/article/us-mining-electric-goldcorp/first-new-all-electric-mine-dumps-diesel-cuts-costs-pollution-idUKKBN1JH2FI>>. Acesso em: 08/06/2019

VARASCHIN, J. *The Economic Case for Electric Mining Equipment and Technical Considerations Relating to their Implementation*. Kingston: Queen's University, 2016. 151p. (Dissertação, Mestrado, Engenharia de Minas).

10. ANEXOS

Anexo 1 - Principais equipamentos elétricos disponíveis no mercado 2019

	Construtores / Modelos - Destaques	
	LHD	Caminhões
Elétricos a cabo <i>(cable-powered)</i>	* 2 - 25 m ³ bucket; * Vários fabricantes (Sandvik, Atlas Copco); * Destaque: Sandvik LH 625E	----
Alimentados por linha elétrica <i>(trolley-electric)</i>	----	Kiruna Truck (Atlas Copco): EMT-35 (35 ton) EMT-50 (50 ton)
Híbridos	MTI Canadá (R&D): LHD LT-270 (1,2m ³)	CCMIE Chinese Company: Truck DF45E (45 ton)
Movidos à bateria <i>(battery-powered, full-electric)</i>	* RDH Mining Equipment → LFP Haulmaster 800EB (20ton); * Caterpillar → CAT LHD R1700XE (2019) * Sandvik → Artisan Vehicle [LHD: 4 ton A4 / 10 ton A10] * Atlas Copco/Epiroc → Scooptram (ST7/ST14)	* RDH Mining Equipment → LFP Muckmaster 300EB (2m ³) * Sandvik → Artisan Vehicle Systems [40 ton truck (Z40)] * EPIROC → Truck MT2010 (42ton)

Anexo 2 - Comparativo da tecnologia de equipamentos elétricos para mineração

	Tecnologia	Aplicações	Prós	Contras	Demanda Ventilação
Elétricos à cabo (cable-powered)	Equipamentos conectados via cabo à rede elétrica.	* Produtividade expressiva em block/sublevel caving (curtas distâncias, elevado load factor);	* Redução peso do equipamento (maior carga útil e/ou menor consumo); * Boa performance em operações de curta distância; * Não há recarga.	* Deslocamento pouco flexível (tamanho cabeamento); * Disponibilidade --> Desgaste do cabo por enrolamento, fricção (\$60/m)	Calor
Alimentados por linha elétrica (trolley-electric)	Equipamentos eletrificados via contato com linha elétrica fixa (overhead). Contam com uma unidade a diesel para deslocamentos fora da linha.	* Testado 6 países (EUA, Canadá, Suécia, Austrália, Espanha, Kazaquistão); * Aplicado com sucesso em 3 minas --> DMT superior à 1,5 Km / LOM elevado / ROM superior 0,5 Mtpa. *Destaque: Coleman Mine (VALE, Canadá) --> Kiruna Trucks 50ton; DMT 6,2Km	* Redução do peso do equipamento (maior carga útil e/ou menor consumo) --> uso de 24% energia/tonelada requerida por um diesel * Maior produtividade: boa performance em rampas (2x mais rápido que diesel em grade 14%);	* Elevado CAPEX (infra-estrutura de linha elétrica, cross section de galerias ligeiramente maiores) --> <i>Infra cost per truck</i> corresponde à 75% do custo do equipamento; * Flexibilidade reduzida;	* Calor (Redução de 17% - VALE) * Diesel DPM e gás - reduzido.
Híbridos	Motor a combustão tradicional (ICE) integrado com mecanismo de recuperação de energia em baterias elétricas (RESS)	---	* Possibilidade de recuperação de energia em diversos pontos --> gases à pressão do motor, frenagem; * Tecnologia de CAPEX reduzido e boa maturidade (aplicações em carros urbanos, ônibus, aviões, F1)	---	* Gases e particulados DPM; * Calor;
Movidos à bateria (battery-powered, full-electric)	* Equipamentos movidos à baterias recarregáveis; * Tipos: LFP (Lithium Iron Phosphate) ou LI (Lithium Ion)	Macassa Gold Mine (Canadá): Truck e LHD da marca RHD desde 2013	* Versatilidade; * Capacidade de operar em <i>overload</i> --> Elevado torque (mesmo à baixa velocidade)	* Autonomia limitada (capacidade armazenamento de energia) --> 4h para uma LHD do tipo LFP * Tempo de carga e troca de carga entre turnos --> novos procedimentos operacionais; * Densidade energética baixa (energia por Kg de bateria) --> peso do eqpto similar a um diesel de igual performance.	* Calor (até 40% menor)