



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



ARILDO DE OLIVEIRA DA SILVA FILHO

**TECNOLOGIAS E PRÁTICAS QUE DIMINUEM O CUSTO E AUMENTAM A
CONFIABILIDADE DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO**

OURO PRETO
2021

ARILDO DE OLIVEIRA DA SILVA FILHO

**TECNOLOGIAS E PRÁTICAS QUE DIMINUEM O CUSTO E AUMENTAM A
CONFIABILIDADE DE SISTEMA DE VENTILAÇÃO**

Monografia submetida à apreciação da banca examinadora de graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos necessários para a obtenção de grau de bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. José Margarida da Silva

**OURO PRETO
2021**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586t Silva Filho, Arildo de Oliveira da.
Tecnologias e práticas que diminuem o custo e aumentam a confiabilidade do sistema de ventilação. [manuscrito] / Arildo de Oliveira da Silva Filho. - 2021.
54 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. José Margarida Silva.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Mineração subterrânea. 2. Minas - Ventilação. 3. Minas - Segurança. 4. Custos. 5. Simulação (Computadores). I. Silva, José Margarida. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.41

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos dezesseis dias do mês de abril de 2021, às 17h30min, foi instalada a sessão pública remota para a defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do discente **Arildo de Oliveira da Silva Filho**, matrícula 16.2.1849, intitulado: **TECNOLOGIAS E PRÁTICAS QUE DIMINUEM O CUSTO E AUMENTAM A CONFIABILIDADE DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO**, perante comissão

avaliadora constituída pelo orientador do trabalho, Prof. Dr. José Margarida da Silva, Prof^a. Dr^a. Rita de Cássia Pedrosa Santos e Prof. Dr. Elton Destro. A sessão foi realizada com a participação de todos os membros por meio de videoconferência, com base no regulamento do curso e nas normas que regem as sessões de defesa de TCC. Inicialmente, o presidente da comissão examinadora concedeu ao discente 20 (vinte) minutos para apresentação do seu trabalho. Terminada a exposição, o presidente concedeu, a cada membro, um tempo máximo de 20 (vinte) minutos para perguntas e respostas ao candidato sobre o conteúdo do trabalho, na seguinte ordem: primeiro a Prof^a. Dr^a. Rita de Cássia Santos Pedrosa, segundo, Prof. Dr. Elton Destro e em último, o Prof. Dr. José Margarida da Silva. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a sessão, o presidente solicitou ao discente aos espectadores que se retirassem da sessão de videoconferência para que a comissão avaliadora procedesse à análise e decisão. Após a reconexão do discente e demais espectadores, anunciou-se, publicamente, que o discente foi aprovado por unanimidade, com a nota 8,8 (oito inteiros e oito décimos), sob a condição de que a versão definitiva do trabalho incorpore todas as exigências da comissão, devendo o exemplar final ser entregue no prazo máximo de 15 (quinze) dias. Para constar, foi lavrada a presente ata que, após aprovada, foi assinada pela presidente da comissão. O discente, por sua vez, encaminhará uma declaração de concordância com todas as recomendações apresentadas pelos avaliadores. Ouro Preto, 16 de abril de 2021.

José Margarida da Silva

Presidente: Prof. Dr. José Margarida da Silva

Membro: Prof^a. Dr^a. Rita de Cássia Santos Pedrosa

Membro: Prof. Dr. Elton Destro

Discente: Arildo de Oliveira da Silva Filho

Aos meus pais Arildo e Cláudia por todo carinho e apoio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a Nossa Senhora por terem me dado forças e a oportunidade de poder concluir esta etapa da minha vida.

Aos meus pais, Arildo e Cláudia, e à minha irmã, Kalantha, pelo carinho, incentivo e apoio sempre.

A todos os professores da Universidade Federal de Ouro Preto, pela dedicação, paciência e ensinamentos.

Aos amigos de Campanha e da Ouro Preto que sempre me apoiaram e contribuíram para minha formação pessoal e profissional.

Aos meus irmãos da república Casaca por me dar apoio nas horas difíceis e por compartilharmos juntos os momentos mais engraçados e felizes da graduação.

Ao professor José Margarida Silva pela orientação, apoio e paciência.

“Nenhum obstáculo será grande se sua vontade de vencer for maior”

Kobe Bryant

RESUMO

O ambiente de mineração subterrâneo em condições normais é nocivo à saúde humana, devido à presença de gases e outros fatores prejudiciais e se torna necessário garantir o maior controle possível da qualidade do ar. Com a expansão das galerias e o aumento da profundidade das minas subterrâneas, os sistemas de ventilação têm se tornado cada vez mais complexos, conseqüentemente consomem cada vez mais energia e representam uma parcela considerável dos custos do empreendimento. Este trabalho, por meio revisão de literatura de artigos, dissertações de graduação e pós-graduação, teses de doutorado e projetos aplicados, buscou analisar e dissertar sobre práticas e tecnologias desenvolvidas na área que visam à melhor compreensão do tema, à diminuição dos custos e ao aumento da segurança. O uso da VOD (Ventilação sob demanda), a captação periódica de medições e a simulação de redes de ventilação em softwares, prévia ou de controle, aumentam a assertividade em um projeto de ventilação, assim como no redimensionamento das redes de minas em expansão. São práticas que apresentaram resultados muito bons quando aplicadas, principalmente em conjunto, ajudando na redução de custo e controlando a qualidade do ar até em situações de sinistro.

Palavras-chave: Ventilação de mina; Custos; Softwares de simulação; Consumo de energia; Ventilação sob demanda.

ABSTRACT

The underground mining environment under normal conditions is harmful to human health, due to the presence of gases and other harmful factors; it is necessary to ensure the greatest possible control of air quality. With the expansion of the galleries and the increase in the depth of the underground mines, ventilation systems have become increasingly complex, consequently consuming more and more energy and representing a considerable part of the costs of the enterprise. This work by reviewing the literature of articles, undergraduate and graduate dissertations, doctoral theses and applied projects sought to analyze and dissert about practices and technologies developed in the area that aim to reduce costs and increase safety. The use of VOD (Ventilation on demand), the periodic capture of measurements and the simulation of ventilation networks in software increase the assertiveness in a ventilation project as well as in the resizing of the expanding mine networks. These are practices that have shown very good results when applied, mainly together, helping to reduce costs and controlling air quality even in accident situations.

Keywords: Mine ventilation; Costs; Simulation softwares; Energy consumption; VOD.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Diagrama de nuvem de palavras em estudos sobre ventilação em minas subterrâneas.	3
Figura 2 – Fatores contribuintes para ameaças (riscos) e métodos de controle de ventilação em mina .	7
Figura 3 - Elementos essenciais de um sistema de ventilação	10
Figura 4 - Tipos de sistemas auxiliares de sobreposição: (a) sistema soprante com sobreposição de exaustão; (b) sistema exaustor com sobreposição soprante.	12
Figura 5 - Localização dos ventiladores no sistema de ventilação subterrâneo	13
Figura 6 - Representação de uma mina usando o VOD.	19
Figura 7 - Demanda por ventilação em uma mina com VOD de acordo com as atividades executadas.	20
Figura 8 - Gráfico de economia potencial x custo de investimento, por meio da aplicação da VOD..	24
Figura 9 - Redução do consumo energético pela implantação da VOD.....	24
Figura 10 - Monitores mostrando parâmetros da rede de ventilação em tempo real.....	27
Figura 11 - Sistema de ventilação da mina de cobre de dahongshan plotado no matlab, onde os ramos vermelhos correspondem a pontos de recirculação de ar	30
Figura 12 - Interface obtida pelo uso da programação no solidwoks simulando a ventilação de uma mina hipotética de metal.	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição da atmosfera subterrânea e proporção que estão contidos os gases	5
Tabela 2 - Limite de tolerância dos principais gases nocivos para saúde humana contidos em um ambiente de mineração subterrânea	8
Tabela 3 - Consumo de energia e custo por tonelada para cada atividade presente no ciclo da mineração subterrânea, em estudo realizado em minas no Canadá.	14
Tabela 4 - Relação do número de trabalhos usados no artigo apresentado no II Simpósio Internacional de Ventilação da América do Sul.....	14
Tabela 5 - Relação do local em que a VOD foi aplicada nos estudos de Maciel (2016) e Pereira (2018) na mina de Vazante.	23
Tabela 6 - Parâmetros dos ramos da mina de Dongai antes (2d) e depois (3d) da simulação do projeto	32

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	2
2.1 Objetivo Geral	2
2.2 Objetivos Específicos	2
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1 Importância da Ventilação	4
3.2 Objetivos da Ventilação	4
3.3 Controle da Atmosfera Subterrânea e da Poluição do Ar	5
3.4 Normas e Regulamentação	7
3.5 Medições	8
3.6 Componentes do Sistema	10
3.7 Tipos de Sistemas de Ventilação e de Ventiladores	11
3.8 Custos	13
3.9 VOD - Ventilação Sob Demanda	14
4 METODOLOGIA	16
5 RESULTADOS	17
5.1 Ventilação Sob Demanda (VOD)	18
5.2 Importância de Medições e Calibragem na Eficiência da Ventilação	24
5.3 Importância da Simulação no Dimensionamento dos Sistemas e Aplicação de Melhorias	28
6 DISCUSSÃO	33
7 CONCLUSÕES	35
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

1 INTRODUÇÃO

A lavra em minas subterrâneas acontece em um ambiente desafiador que, em condições normais, é desafiador para o trabalho humano e merece atenção. Gases tóxicos, gases inflamáveis, combustíveis e a poeira tornam o ar de má qualidade, tornando-o prejudicial para a saúde humana (RAMJACK, 2015).

Os trabalhadores não devem ser expostos à níveis excessivos de CO₂, poeira, umidade, temperatura, explosões tóxicas, gases estratificados e principalmente emissões de dióxido de nitrogênio (NO₂) de veículos a diesel (CANADIAN MINING JOURNAL, 2020).

De acordo De Villiers *et al.* (2019), as minas estão continuamente se expandindo em tamanho e profundidade, tornando cada vez maior a dependência dos sistemas de ventilação subterrânea localizados, o que tem exigido a ampliação dos conhecimentos em áreas como a ventilação. Além de ser necessária ampliação dos conhecimentos de ventilação, áreas como mecânica das rochas e desmonte por explosivos vem sendo muito estudadas (SILVA *et al.*, 2021).

Darling (2011) mostra quadro de fatores contribuintes para ameaças (riscos) e métodos de controle de ventilação em mina. Reforça que planejamento de ventilação deve ser processo contínuo e os efeitos do tempo tem que ser cuidadosamente estabelecidos.

Com vistas à melhoria da economia e da segurança, a academia e as empresas têm se dedicado a questões como avaliação de aplicativos computacionais, comparação de soluções, incluindo a simulação, sistemas de ventilação combinados, avaliação de normas, estudo das fontes de calor, determinação de propriedades relativas ao fluxo de calor, medição de drenagens de gases, instrumentação de mina, alternativas de diminuição de custos, também com a CFD (Dinâmica de fluidos computacionais) e com equipamentos elétricos e híbridos, ventilação sob demanda, redução das perdas de pressão e da recirculação de ar; eficiência de ventiladores, avaliação de riscos e sinalização de rota de fuga.

Por meio da revisão de literatura de artigos, trabalhos acadêmicos e teses de pós-graduação foi feito um levantamento de tecnologias, práticas e fatores que vem sendo estudados e implementados para redução de custo e aumento da eficiência e confiabilidade dos sistemas de ventilação. Foram abordadas a contribuição da ventilação sob demanda (VOD) para redução de custos, a importância das medições de propriedades do ambiente da mina e a importância das simulações para desenvolvimento de novos projetos e alterações nos sistemas já existentes.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do seguinte trabalho é mostrar um panorama geral de tecnologias, práticas e fatores que podem diminuir os custos de operação de um sistema ventilação e ajudar a fazer seu planejamento ou adaptação de maneira mais precisa.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos foram:

- Avaliar a contribuição da ventilação sob demanda (VOD) e a redução de custos que ela proporciona;
- Enfatizar a importância de medições e calibragem constantes na eficiência da ventilação e consequente controle de custo;
- Avaliar a importância da simulação para projetar sistemas de ventilação e para a correção de problemas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Devido ao aumento da produção e da vida útil, o aprofundamento das minas subterrâneas vem acontecendo em maior escala nos últimos anos. Esse fato gera aumento de temperatura, pelo grau geotérmico das rochas presentes. O aumento da temperatura é explicado pelo gradiente geotérmico, que é o aumento de temperatura na medida que se aprofunda em direção ao centro da terra.

Essas condicionantes fazem com que sejam necessários, além de um bom planejamento, o remodelamento e readequação dos sistemas de ventilação para atender às novas demandas de ar. Muitos estudos e trabalhos vêm sendo feitos no Brasil e ao redor do mundo, buscando maneiras de aumentar a eficiência e diminuir o consumo energético destes sistemas.

A Figura 1 mostra os principais termos e assuntos abordados nos estudos da área, principalmente nos últimos cinco anos.



Figura 1- Diagrama de nuvem de palavras em estudos sobre ventilação em minas subterrâneas.

3.1 Importância da Ventilação

MCPerson (1993) afirma que a ventilação às vezes é descrita como o sangue vital de uma mina, sendo as vias de entrada as artérias que transportam o oxigênio para as áreas de trabalho e as veias, as vias de retorno que conduzem os poluentes para serem expelidos para a atmosfera externa. Sem um sistema de ventilação eficaz, nenhuma instalação subterrânea que requeira a entrada de pessoal pode operar com segurança.

Segundo Xu *et al.* (2018), a ventilação é considerada frequentemente como um dos maiores fatores de restrição na produção de uma mina. Os mesmos autores afirmam que o planejamento eficaz do sistema de ventilação é imprescindível na mineração subterrânea, uma vez que ele é responsável por fornecer a vazão necessária de ar fresco, manter as condições climáticas adequadas para as frentes de trabalho, diluir o metano (e outros gases) e remover contaminantes subterrâneos.

Kazakov *et al.* (2014) afirmam que o sistema de ventilação deve garantir a ventilação sustentável nas principais vias aéreas da mina em caso de emergências como: queda de blocos; incêndios; explosões; de maneira que garanta uma saída segura até a superfície para os trabalhadores.

As melhorias na ventilação permitiram o aumento da produtividade das minas. Os engenheiros responsáveis pela ventilação subterrânea são inseridos em um ciclo, permitindo aumento da produção e da profundidade das minas. Esses fatores aumentaram a quantidade de poeira, gases e calor, resultando em uma demanda por um controle ambiental ainda melhor (MCPHERSON, 1993).

3.2 Objetivos da Ventilação

De acordo com MCPerson (1993), o objetivo básico de um sistema de ventilação subterrâneo é nada mais do que fornecer fluxos de ar, de vazão e qualidade suficientes para diluir os contaminantes em concentrações seguras em todas as partes da instalação onde o pessoal é obrigado a trabalhar ou transitar.

O projeto de um grande sistema de ventilação subterrânea e o controle ambiental constituem um processo complexo com muitos recursos interativos. Porém, a ventilação e o ambiente subterrâneo não devem ser tratados isoladamente durante as atividades de planejamento, pois

eles são uma parte integrante do projeto geral da mina ou instalação subterrânea. (MCPHERSON, 1993).

Segundo Hartman e colaboradores (1997), o sistema de ventilação objetiva realizar as seguintes melhorias no ar do ambiente.

1. Controle de qualidade

- a) Controle de gases- vapor, gases e radiação.
- b) Controle de poeira- particulados.

2. Controle de quantidade

- a) Ventilação.
- b) Ventilação auxiliar.
- c) Exaustão local.

3. Controle de temperatura- umidade (calor sensível e latente)

- a) Resfriamento.
- b) Aquecimento.
- c) Umidificação.

3.3 Controle da Atmosfera Subterrânea e da Poluição do Ar

Os seres humanos vivem por meio da respiração do ar de qualidade, no qual está contido o oxigênio que os mantém vivos, não podendo ficar sem ele durante mais de 3 minutos senão o cérebro irá colapsar e posteriormente morrer. A Tabela 1 mostra quais são os gases naturalmente presentes em minas subterrâneas.

Tabela 1 - Composição da atmosfera subterrânea e proporção que estão contidos os gases (ORTIZ, 2019).

GÁS NATURAL	COMPOSIÇÃO EM VOLUME	
	%	ppm
Nitrogênio (N ₂)	78,08	7800800
Oxigênio (O ₂)	20,95	209500
Argônio (A)	0,93	9300
Dióxido de Carbono (CO ₂)	0,03	300
Outros	0,01	100

A baixa concentração de oxigênio (O_2), além de ser prejudicial à vida humana, também prejudica a operação de equipamentos de equipamentos pesados, sendo descrita a seguir (ORTIZ, 2019).

- O ar com menos de 16% de oxigênio causará a morte. Ele deve conter no mínimo 19 % (NR-22) de oxigênio para manter as condições ideais para o ser humano.
- Em equipamentos pesados quando há a falta de ar de qualidade os mesmos acabam aspirando o gás evacuado e os motores operam com ineficiência, causando perda de força e consequente parada pela falta de oxigênio.

Os contaminantes mais comuns no ambiente subterrâneo e sua origem são os seguintes (ORTIZ, 2019).

- CO e CO_2 - combustão incompleta de matéria carbonosa, gases de escape de motores a diesel.
- NO e NO_2 - detonação incompleta de explosivos, gases de escape de motores a diesel.
- SO_2 – formado na detonação de minério de enxofre, durante incêndios envolvendo sulfetos (pirita), gases de veículos a diesel.
- Metano (CH_4) - jazidas minerais de origem orgânica (carvão), apodrecimento de madeira usada em escoramento.
- H_2S - presente em jazidas minerais de origem orgânica (carvão).
- NH_3 - liberado na detonação de explosivos a base de ANFO.

Alguns gases presentes no ambiente subterrâneo normalmente não são nocivos, à medida que sua concentração aumenta ou ocorre exposição prolongada. Eles se tornam nocivos à saúde e podem até provocar a morte. De acordo com o efeito que geram no corpo humano esses gases podem ser classificados como: asfixiantes simples e tóxicos (ORTIZ, 2019).

Os gases asfixiantes simples são fisiologicamente inertes e perigosos quando sua concentração está alta, o aumento da sua concentração se deve pela diminuição da proporção de oxigênio. São substâncias que deslocam o oxigênio do ar e provocam a asfixia pela diminuição da concentração do oxigênio no ar inspirado. Exemplo: etano, metano, gás carbônico (CO_2), acetileno, nitrogênio, hidrogênio. Os gases tóxicos mesmo quando presentes em pequenas concentrações produzem efeitos prejudiciais à saúde. Exemplo: monóxido de carbono (CO).

A figura 2 mostra quadro de fatores contribuintes para ameaças (riscos) e métodos de controle de ventilação em mina.

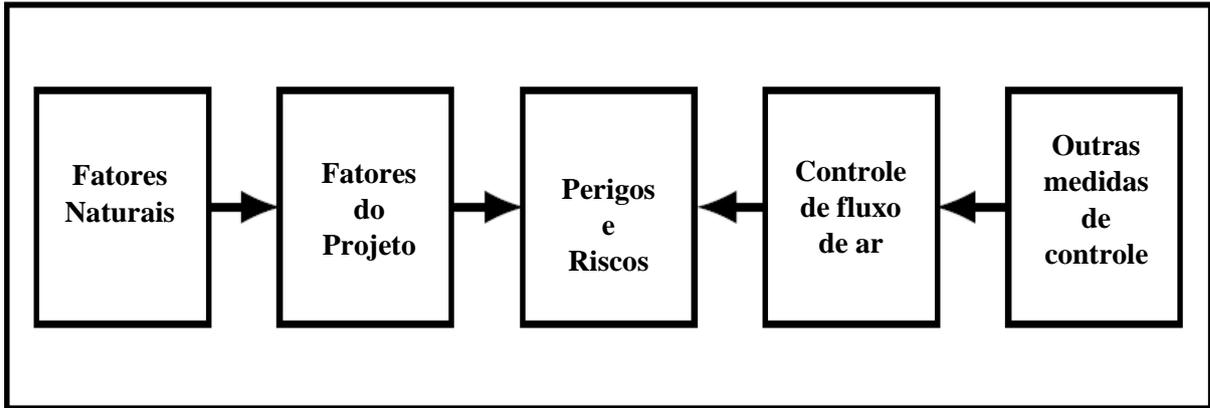


Figura 2 - Fatores contribuintes para ameaças (riscos) e métodos de controle de ventilação em mina (DARLING, 2011).

3.4 Normas e Regulamentação

De acordo com Shriwas e Calizaya (2018), o sistema de ventilação, além de garantir a saúde e segurança do pessoal, deve operar de acordo com os órgãos de regulamentação. As regulamentações de saúde e segurança ocupacional normalmente contêm um requisito legal que limita a exposição a contaminantes nocivos no ar abaixo de um nível prescrito, chamados de limites de exposição ocupacional/ permissível (ACUÑA *et al.* 2014).

A maneira como se define "quantidade e a qualidade" do fluxo do ar em uma mina varia de país para país, dependendo de fatores como: seu histórico de lavra; poluentes de maior preocupação; perigos percebidos associados e a estrutura política e social do país. O requisito geral é que todas as pessoas possam trabalhar e transitar em um ambiente seguro e que ofereça conforto razoável (MCPHERSON, 1993).

A NR-15, norma que regulamenta as atividades de trabalho em ambientes insalubres no Brasil, como é o caso da mineração subterrânea, estabelece os limites de tolerância dos principais gases contidos neles, que estão localizados em seu ANEXO 11 e exemplificados na Tabela 2.

Tabela 2 - Limite de tolerância dos principais gases nocivos para saúde humana contidos em um ambiente de mineração subterrânea (MACHADO, 2011).

Gases	Limites de Tolerância
CO	39 ppm
CO ₂	3900 ppm
NO _x	4 ppm
H ₂ S	8 ppm
SO ₂	4 ppm
NH ₃	20 ppm

De acordo com a NR-22, que disciplina os preceitos a serem seguidos no ambiente de mineração, as atividades em subsolo devem dispor de sistema de ventilação mecânica que atenda os seguintes requisitos:

- Suprimento de oxigênio;
- Renovação contínua do ar;
- Diluição eficaz de gases inflamáveis ou nocivos e de poeiras do ambiente de trabalho;
- Temperatura e umidade adequadas ao trabalho humano;
- Ser mantido e operado de forma regular e contínua.

3.5 Medições

Chatterjee, Zhang e Xia (2015) destacam que diferentes fluxos de ar serão requeridos para o sistema de ventilação ao longo do dia em uma frente de trabalho. Essa variação ocorre de acordo com as atividades que estão sendo nela desenvolvidas, pois cada uma necessitará de um fluxo específico. As atividades cíclicas das minas subterrâneas (perfuração, carregamento de explosivos, desmonte, limpeza e carregamento) irão necessitar de vazões de ar diferentes, com a limpeza requerendo a maior vazão de ar entre elas e o desmonte irá requerer nenhuma.

De acordo com Xu *et al.* (2018) é comum e desejável que o levantamento de ventilação seja feito de maneira periódica, para o registro e a análise dos dados que irão gerar um relatório do levantamento da ventilação. Ele é nada mais que um procedimento sistemático que busca obter os dados de pressões e quantidades de ar nas vias de acesso e a distribuição de fluxo de ar no sistema.

Segundo Szlazak, Obracaj e Korzec (2018) para a análise da distribuição de fluxo de ar são necessárias a medição e coleta dos seguintes dados: pressão barométrica nos nós da rede de ventilação; temperatura do ar de bulbo seco e bulbo úmido no início e final da escavação; velocidade do ar nas escavações.

A mineração e outras atividades precisam de grandes espaços subterrâneos - escavações, túneis utilitários, estações de energia subterrâneas e túneis (galerias), a troca de calor com fluxo de ar e superfície isotérmica é um processo de transferência de calor complicado e instável na maioria dos casos. A tecnologia de ventilação, como controle de temperatura, umidade e ruído, tem sido amplamente estudada.

Cerca de 40 a 80% da energia consumida por ventiladores primários (item 3.7) é usada para superar as resistências dos componentes dos conjuntos de ventiladores. Fazendo-se o projeto de engenharia e a instalação de maneira adequada esses sistemas podem operar com maior eficiência (DE SOUZA, 2015, citado por DE VILLIERS *et al.*, 2019).

Segundo De Villiers *et al.* (2019) livros e estudos descrevem as ineficiências de energia presentes em conjuntos de ventiladores auxiliares da mina, que são as seguintes: vazamentos nos dutos, ineficiências dos ventiladores, vazamentos nas portas, perdas de pressão nos dutos devido a fatores de fricção, desempenho insatisfatório do ventilador e instalações ruins.

Xu *et al.* (2018) afirmam que as medições das resistências de uma mina (resistência das rochas, rugosidade das paredes, obstáculos, desvios) podem não refletir valores reais, devidos a possíveis fontes de erro. Os mais comuns são:

- De operação;
- De aplicação de resultados parciais de algumas vias que são aplicados em vias semelhantes ou em toda a via área;
- De aplicação da resistência empírica em vias aéreas de difícil acesso.

Acredita-se que a medição da quantidade de fluxo de ar (Q) é mais precisa que a medição da resistência (R). Isso é explicado pelo fato de a resistência ser calculada com base na queda de pressão medida e na quantidade de fluxo de ar em uma seção das vias aéreas ou com base em valores empíricos, enquanto a medição do fluxo de ar é feita diretamente com o mínimo procedimento e erros operacionais (XU *et al.*, 2018). A Equação (1) mostra a dependência dessas grandezas:

$$P = R \times Q^2 \qquad \text{Eq. (1)}$$

Em que:

P = potência (kW);

R = resistência (Ns^2/m^8);

Q = fluxo de ar (m^3/s).

3.6 Componentes do Sistema

O sistema de ventilação de mina subterrânea apresenta vários componentes; elementos que são essenciais para o seu funcionamento. Os principais meios de produção e controle de fluxo de ar são mostrados na Figura 3.

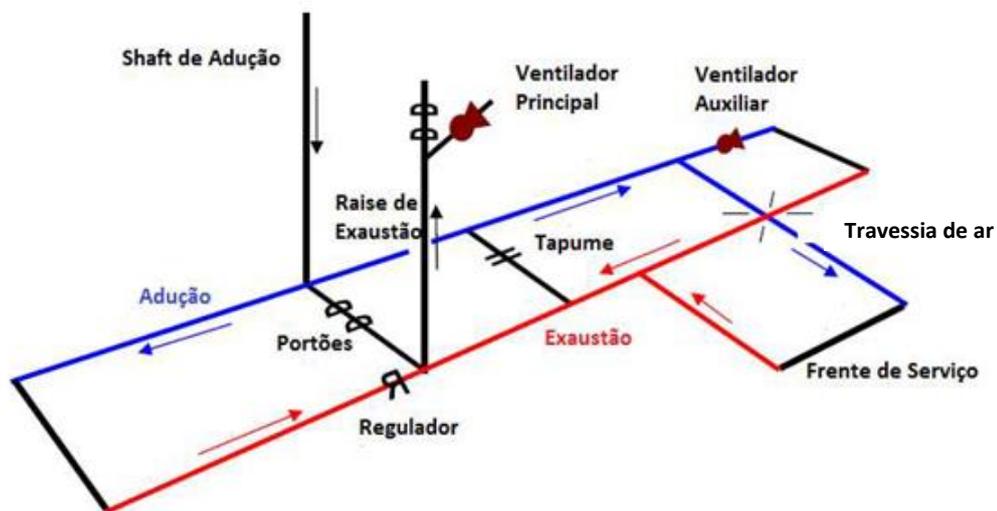


Figura 3 - Elementos essenciais de um sistema de ventilação (Traduzido de MCPHERSON, 1993).

A função dos elementos mais comuns de um sistema de ventilação é descrita a seguir.

- Ventiladores (*fans*): controlam o ar que passa pelo sistema, podendo estar ou não localizados na superfície. Podem exaurir o ar do sistema ou forçá-lo para dentro do sistema.
- Paradas e selos (*stoppings*): usadas para bloquear a circulação de ar em regiões em que o acesso ou a ventilação não são mais necessários, evitam que haja o curto-circuito do fluxo de ar. Podem ser construídos de materiais como: alvenaria, blocos de concreto, blocos de madeira à prova de fogo e até rolas de aço pré-fabricadas.

- Portas e eclusas de ar (*doors*): portas de madeira ou de aço com dobradiças de forma que se abrem para o sentido de pressão de ar mais alta. São usadas em lugares onde o acesso deve ficar disponível entre uma entrada e uma via aérea de retorno, portas são equipadas com elas.
- Reguladores (*regulators*): são portas equipadas com um ou mais orifícios ajustáveis (passivo), que tem por objetivo reduzir o fluxo de ar a um valor desejável em uma via aérea ou em uma seção da mina.
- Travessias de ar (*air crossings*): usadas para controlar possíveis vazamentos quando vias aéreas de admissão e de retorno precisam se cruzar. A forma mais comum de execução dela é por meio da elevação do teto ou escavação de material adicional do chão de uma das vias aéreas que se cruzam.

3.7 Tipos de Sistemas de Ventilação e de Ventiladores

Luo *et al.* (2014) classificam o sistema de ventilação de acordo com a quantidade de ventiladores usados: sistema de ventilador único e sistema multi-ventilador.

De acordo com sua aplicação os sistemas de ventilação são divididos em duas categorias: Principal e Auxiliar. O sistema principal é responsável por trazer ar fresco da superfície para as proximidades da frente de trabalho, além de levar o ar usado (viciado) para a superfície. Já o sistema auxiliar cria um circuito no qual o ar será retirado das rotas aéreas primárias nas frentes de trabalho ativas, com a finalidade de diluir e remover os contaminantes, após isso retornará ao circuito primário (ACUÑA *et al.*, 2014).

Segundo MCPerson (1993) a escolha do sistema de ventilação auxiliar leva em conta fatores como: calor, gases, poluentes e poeira. De acordo com essa análise, é feita a escolha do sistema de ventilação auxiliar a ser empregado, podendo ser exaustor (sugar o ar viciado) ou soprante (insere ar limpo). Ambos possuem vantagens e desvantagens, com isso torna-se comum a combinação das vantagens de ambos em sistemas que são chamados de sistemas de sobreposição. Os tipos de sistema de sobreposição são mostrados na Figura 4.

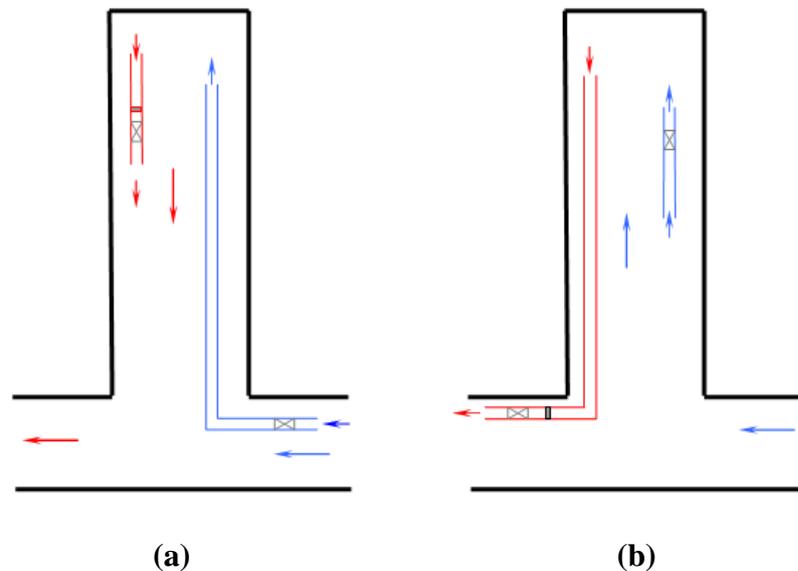


Figura 4 - Tipos de sistemas auxiliares de sobreposição: (a) Sistema soprante com sobreposição de exaustão; (b) Sistema exaustor com sobreposição soprante. (MCPHERSON, 1993).

Na Figura 3 os retângulos com X no meio representam os ventiladores, as linhas paralelas contínuas representam os dutos de ventilação e as setas representam o sentido de circulação do ar, onde a cor azul representa o ar limpo e a cor vermelha representa o ar viciado.

Segundo De Villiers *et al.* (2019) existem vários tipos de ventiladores, que são empregados em minas profundas de acordo com o resultado que se deseja alcançar e as características particulares de cada mina. Os tipos de ventilador e suas funções são as seguintes.

- Ventiladores primários: são grandes ventiladores que impactam de maneira significativa o fluxo de ar total de uma mina, são ventiladores de extração em superfície.
- Ventiladores de reforço (*boosters*): são ventiladores de menor porte que são combinados em série com os ventiladores primários. Sua finalidade é auxiliar os ventiladores primários a superar as resistências ao fluxo de ar da mina.
- Ventiladores de desenvolvimento: são ventiladores auxiliares usados para ventilar uma frente de trabalho sem fluxo de ar.
- Ventiladores distritais ou de circuito: são conjuntos de ventiladores auxiliares que são usados para direcionar o fluxo de ar para uma área específica.

A localização desses ventiladores em uma mina subterrânea é mostrada na Figura 5.

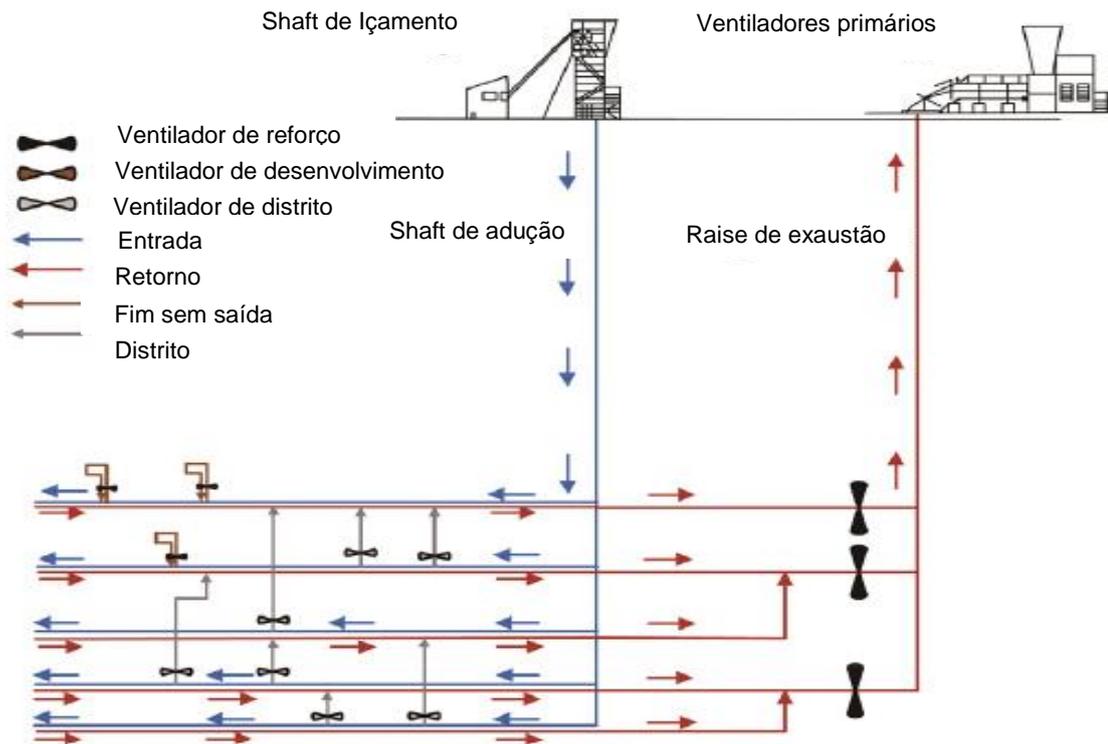


Figura 5 - Localização dos ventiladores no sistema de ventilação subterrâneo (DE VILLIERS *et al.*, 2019).

3.8 Custos

Chatterjee, Zhang e Xia (2015) afirmam que, de acordo com estudos, os sistemas de ventilação podem corresponder a 40% do consumo de energia elétrica e a 60% do custo operacional de uma mina subterrânea, com os ventiladores sendo os grandes responsáveis pelo alto consumo de energia deles.

Segundo De Souza (2015) na primeira década deste século, devido ao alto custo e consumo de energia elétrica que demandam os sistemas de ventilação subterrâneos, eles poderiam chegar a corresponder a algo em torno de 25 a 50% do consumo energético de um empreendimento de mineração subterrânea.

Devido aos altos custos envolvidos, estão sendo feitos estudos de otimização das redes de ventilação, “onde devem ser levados em conta o consumo energético e o custo de construção delas” (LI *et al.*, 2018).

Os mesmos autores afirmam que o principal objetivo dos estudos de otimização de uma rede de ventilação de minas é desenvolver um método de controle do sistema de ventilação, que irá minimizar o custo total de ventilação da mina.

Em 2005, o CIPEC (Canadian Industry Program for Energy Conservation), que é o Programa da Indústria Canadense para Conservação de Energia, fez um estudo em 11 minas de minerais metálicos (ouro, cobre e chumbo/zinco) locais, buscando levantar o consumo energético e os custos envolvidos em cada atividade presente no ciclo de operação de uma mina subterrânea. Em média a ventilação de uma mina subterrânea correspondeu a praticamente 33% dos custos do empreendimento e a cerca de 42% do consumo energético. Esses dados são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Consumo de energia e custo por tonelada para cada atividade presente no ciclo da mineração subterrânea, em estudo realizado em minas no Canadá (Adaptado de COSTA & SILVA, 2019).

Atividade	CUSTO (\$)			Consumo de energia (kW.h)			Representatividade	
	Mínimo	Máximo	Médio	Mínimo	Máximo	Médio	Custos	Energia
Perfuração	0,13	0,72	0,43	3,96	13,74	8,85	6,92%	8,90%
Desmonte	0,21	3,23	1,72	0,49	2,38	1,44	27,99%	1,44%
Carregamento	0,11	0,33	0,22	3,82	9,94	6,88	3,58%	6,92%
Transporte subterrâneo de minério	0,01	0,25	0,13	0,17	6,79	3,48	2,12%	3,50%
Cominuição subterrânea	0,01	0,08	0,05	0,23	1,53	0,88	0,73%	0,89%
Íçamento	0,10	1,14	0,62	3,94	21,17	12,56	10,09%	12,63%
Transporte de minério para a usina	0,01	0,64	0,33	0,13	14,34	7,24	5,29%	7,28%
Ventilação	1,11	2,92	2,02	27,90	55,31	41,61	32,79%	41,85%
Enchimento	0,03	0,35	0,19	1,36	7,92	4,64	3,09%	4,67%
Bombeamento de água	0,09	0,42	0,26	1,98	7,76	4,87	4,15%	4,90%
Outras atividades	0,05	0,35	0,20	1,00	12,98	6,99	3,25%	7,03%

3.9 VOD - Ventilação Sob Demanda

Como a indústria da mineração tende a ventilar em excesso as áreas de trabalho, pesquisadores identificaram uma oportunidade considerável de se economizar energia, fornecendo ainda os requisitos de fluxo de ar necessário e mantendo as operações eficazes (HARDCASTLE, KOSCIS E CONNOR, 2006). Atualmente essa abordagem é comumente chamada de VOD (Ventilação sob Demanda).

De acordo com Costa (2017) o processo de ventilação sob demanda (VOD) é o resultado de estudos recentes, que tiveram um maior impulso na última década, e que consiste em variar o suprimento de ar nas diversas áreas da mina de acordo com as necessidades exigidas em cada

setor em um dado momento. As quantidades de ar requeridas sofrem modificações de acordo com as alterações dos diversos fatores (concentração de gases, temperatura, poeira, etc.) que dependem, por sua vez, da operação executada, do número de pessoas envolvidas e do tipo e quantidade de equipamentos a diesel solicitados.

Tran-Valade & Allen (2013) afirmam que na ventilação sob demanda existem 5 níveis de aplicação, que podem ser usados individualmente ou em combinação:

- Nível 1: controle manual. Os funcionários de ventilação podem ligar e desligar manualmente os ventiladores e variar os reguladores e portas. Os ventiladores também podem ser equipados com inversores de frequência variável (VFD) e ajustados em velocidade.
- Nível 2: pelo horário do dia. As alterações planejadas na rede não são mais aplicadas manualmente, mas em um padrão de ativação / desativação diária predefinido.
- Nível 3: baseado em eventos. A ventilação é alterada dependendo de certas atividades dentro da mina. Ex: um ventilador auxiliar é ligado após o desmonte para diminuir o tempo de retorno. Em um sistema baseado em eventos, a reação adequada também pode ser dada em caso de incêndios e outros eventos inesperados.
- Nível 4: marcação. Como descrito sob o aspecto de controle de quantidade, marcação implica o conhecimento da posição, características dos veículos e outros poluentes para definir as necessidades de ventilação.
- Nível 5: Ambiental. As redes controladas ambientalmente respondem automaticamente a quaisquer mudanças da condição subterrânea. Isso é considerado como controle de qualidade.

4 METODOLOGIA

O trabalho foi conduzido por meio de uma revisão crítica da literatura e de trabalhos acadêmicos, como projetos integradores, trabalhos de conclusão de cursos de graduação (TCC's), monografias de especialização, dissertações de mestrado, teses de doutorado, artigos de congressos e eventos e artigos de periódicos.

Procedeu-se uma classificação por tema dos referidos trabalhos, configurando a nuvem de palavras mostrada na figura 1.

Foram verificados cerca de trinta trabalhos no Brasil, nessas diversas modalidades, nos últimos vinte anos, que foram objeto de avaliação em artigo apresentado no II Simpósio Internacional de Ventilação da América do Sul, em coautoria. A tabela 4 representa o quantitativo.

Tipo	número
artigos	5
teses	5
dissertações	4
especializações	3
TCCs-projeto integrador	12
Total	29

5 RESULTADOS

A ventilação de minas subterrâneas está passando por importantes desenvolvimentos que visam melhorar seu desempenho e eficácia, corroboram Acuña *et al.* (2014). Pesquisas para monografias (graduação e especialização), dissertações e teses, junto com aquisição de instrumentos de medição mostram isso no Brasil.

Com vistas à melhoria da economia e da segurança, Silva *et al.* (2021) mostram que as pesquisas de ventilação e em minas subterrâneas têm se dedicado a questões, como: avaliação de aplicativos computacionais, comparação de solução analítica e computacional, algoritmo de otimização, sistemas de ventilação combinados soprante-exaustor e multi-ventiladores, avaliação de normas (GANCEV, 2006; MARTINS, 2017), estudo das fontes de calor, determinação de propriedades relativas ao fluxo de calor, medição de drenagens de gases, instrumentação de mina, alternativas de diminuição de custos, ao mesmo tempo em que se fornece os requisitos de fluxo de ar e se mantém uma operação eficaz (COSTA, 2019, COSTA *et al.*, 2020a; COSTA *et al.*, 2020b): equipamentos elétricos e híbridos (Pinto, 2018), projetos de viabilidade (BOTELHO *et al.*, 2011; RIBEIRO, 2016; CARDOSO, 2014), ventilação sob demanda (COSTA *et al.*, 2019; PEREIRA, 2018; COSTA, 2017; PAIVA, 2015; ACUÑA *et al.*, 2014), remodelagem de circuitos, redução das perdas de pressão, controle da recirculação de ar (HUAMING *et al.*, 2011; WANG, 2018); eficiência de ventiladores (SLAZAK *et al.*, 2016), modelo de calibração (XU *et al.*, 2018), caracterização de sistema (WENGUI *et al.*, 2014; BONNETTI, 2017; PINTO *et al.*, 2003), avaliação de riscos (CHARBEL, 2015) e sinalização de rota de fuga (PEREIRA, 2013).

Estudos, segundo os autores, envolvem não só a engenharia de minas, mas ainda a engenharia mecânica, ambiental, elétrica, de produção e de segurança, juntando conhecimentos e aparato, para a ventilação dentro do projeto integrado de lavra. Vários estudos estão apoiados em minas reais (ouro, potássio, carvão), outros em circuitos hipotéticos ou a situação do fechamento de minas.

Devido à crise energética atual, o setor de mineração foi identificado como uma área com potencial para a aplicação de técnicas de gerenciamento ao lado da demanda. Essas técnicas buscam reduzir a diferença entre a fonte de alimentação e demanda amplamente; pela melhoria da eficiência energética; intervenções de conservação; troca de combustível; expansão da carga e autogeração.

O setor industrial consome aproximadamente 37% da energia produzida no mundo, com o setor mineral contribuindo com cerca de 9%. Em algumas minas subterrâneas, de acordo com estudos, o sistema de ventilação pode chegar a corresponder por 40% do consumo de energia elétrica e a 60% do custo do empreendimento (CHATTERJEE *et al.*, 2015, citados por SILVA *et al.*, 2021).

A indústria da mineração tende a ventilar em excesso as áreas de trabalho. Foi identificada uma oportunidade potencialmente significativa de economizar energia, ao mesmo tempo em que se fornece os requisitos de fluxo de ar e mantém uma operação eficaz (HARDCASTLE *et al.*, 2006). Atualmente essa abordagem é comumente chamada de VOD (Ventilação sob Demanda).

De acordo com Xu *et al.* (2018) quando se pretende simular e otimizar redes de ventilação tem se tornando comum a utilização de modelos de rede de ventilação de minas (MVN), buscando garantir uma operação segura e estável do sistema de ventilação. Trata-se de uma ferramenta de planejamento da ventilação que entende a condição atual e prevê as condições para o desenvolvimento futuro da ventilação.

A disponibilidade de instrumentos para medição confiável de parâmetros de ventilação e de redução dos custos, conjugada com a crescente disponibilidade e portabilidade de recursos computacionais, justifica a atenção das empresas no sentido de se projetar sistemas de ventilação de forma mais eficiente. (SILVA, 2018).

De acordo com Ryan e De Souza (2017) o uso de estações de monitoramento contínuas colocadas em locais estratégicos por toda a mina para capturar dados das condições ambientais, permite que várias estratégias possam ser utilizadas no planejamento da mina e na prevenção de exposição a riscos potenciais.

5.1 Ventilação Sob Demanda (VOD)

Segundo Dicks e Clausen (2017), Costa *et al.* (2019), a VOD (Ventilação sob Demanda) é na verdade um nível de automação, em que a otimização envolvida na rede de ventilação tem como objetivos gerais aumentar a produção da mina e economizar energia, controlando de maneira efetiva o fluxo de ar respeitando as normas regulatórias.

A VOD busca ventilar frentes onde estejam sendo realizados trabalhos por pessoas, equipamentos e também remover gases resultantes de detonação, com as frentes sem atividades

não sendo ventiladas. A representação esquemática de uma mina com VOD é mostrada nas Figuras 6 e 7.

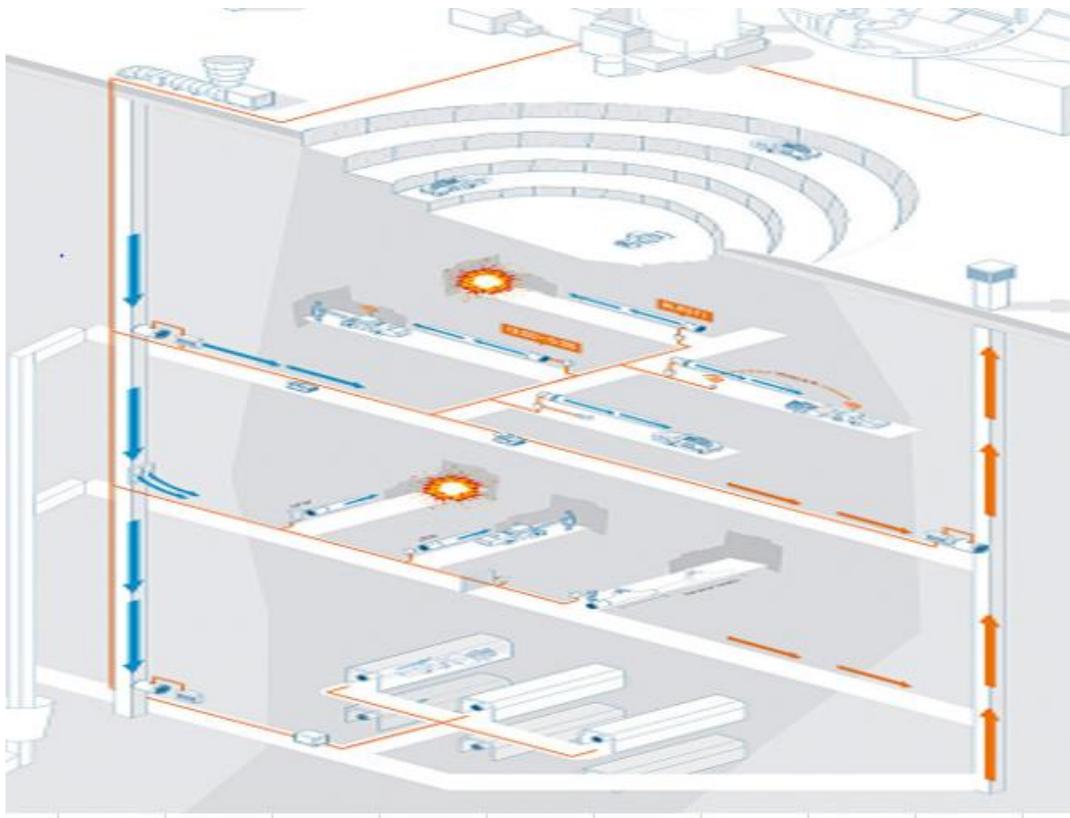


Figura 6 - Representação de uma mina usando o VOD (ABB, 2019).

Na Figura 6, as setas indicadas de azul representam o ar limpo entrando no sistema de ventilação e sendo direcionado apenas para frentes onde seja necessário, essas frentes possuem máquinas operando, pessoas trabalhando ou desmontes com explosivos sendo realizados. As frentes que não possuem trabalhos sendo realizados não são ventiladas, já as setas de cor laranja indicam o ar viciado saindo do circuito de ventilação.

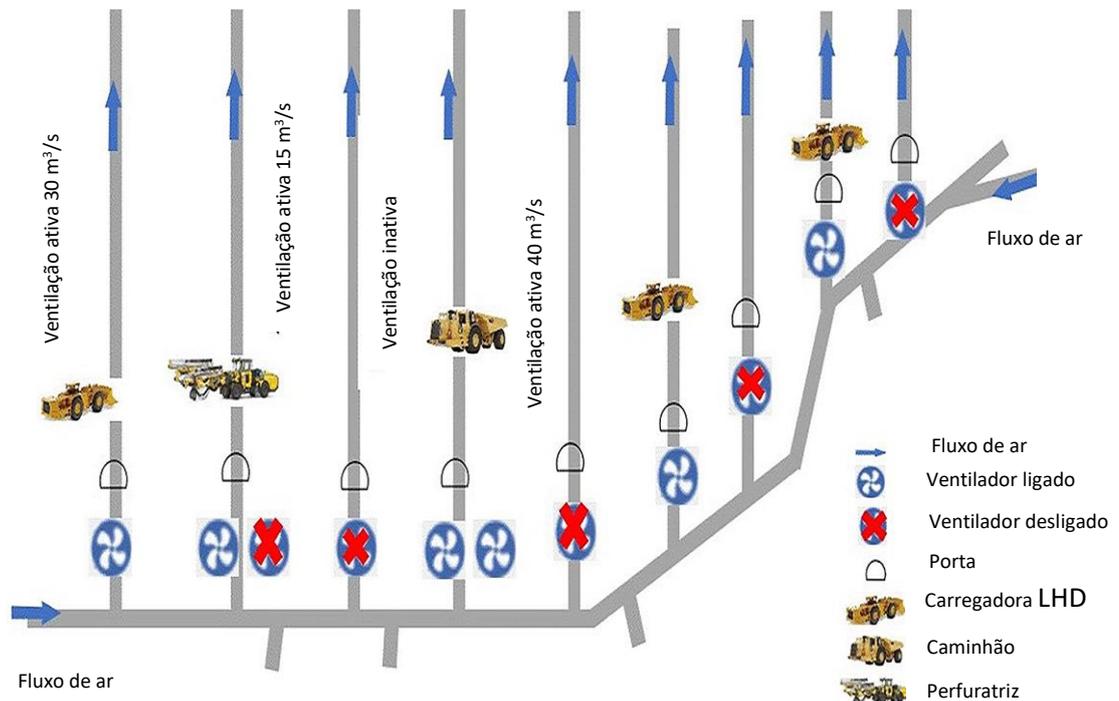


Figura 7 - Demanda por ventilação em uma mina com VOD de acordo com as atividades executadas (COSTA, 2019).

Na Figura 7, frentes com a presença de equipamentos operando estão sendo ventiladas, a vazão de ar nas frentes varia de acordo com a atividade executada e o porte do equipamento que a está realizando, com os equipamentos de maior porte como os caminhões demandando uma vazão maior. As frentes sem trabalho de equipamentos não se encontram ventiladas e os ventiladores delas estão desligados.

Mutmansky *et al.* (2006) realizaram um estudo em que concluíram que o sistema de ventilação auxiliar é necessário apenas continuamente da chegada do veículo, durante sua atividade e até 10 min após a última partida.

Nie *et al.* (2018) estudaram temperatura na mina Jinqi Gold e, após otimização, conseguiram a redução de 5,6° C, com resfriamento. Buscando avaliar os impactos econômicos em potencial na ventilação, eles realizaram uma análise com base na demanda de ventilação estimada (m^3/s). Eles consideraram que a metodologia mais correta seria redimensionar a potência instalada dos ventiladores (em kW, principais e secundários) para a nova demanda de ventilação. Isso foi possível com a utilização da ventilação sob demanda (VOD) por meio de inversores de frequência para modular a velocidade dos ventiladores.

A figura 8 mostra a relação entre o investimento e a economia potencial gerada pela aplicação da VOD em um sistema de ventilação já existente e em um novo sistema.

Investimentos x Economia

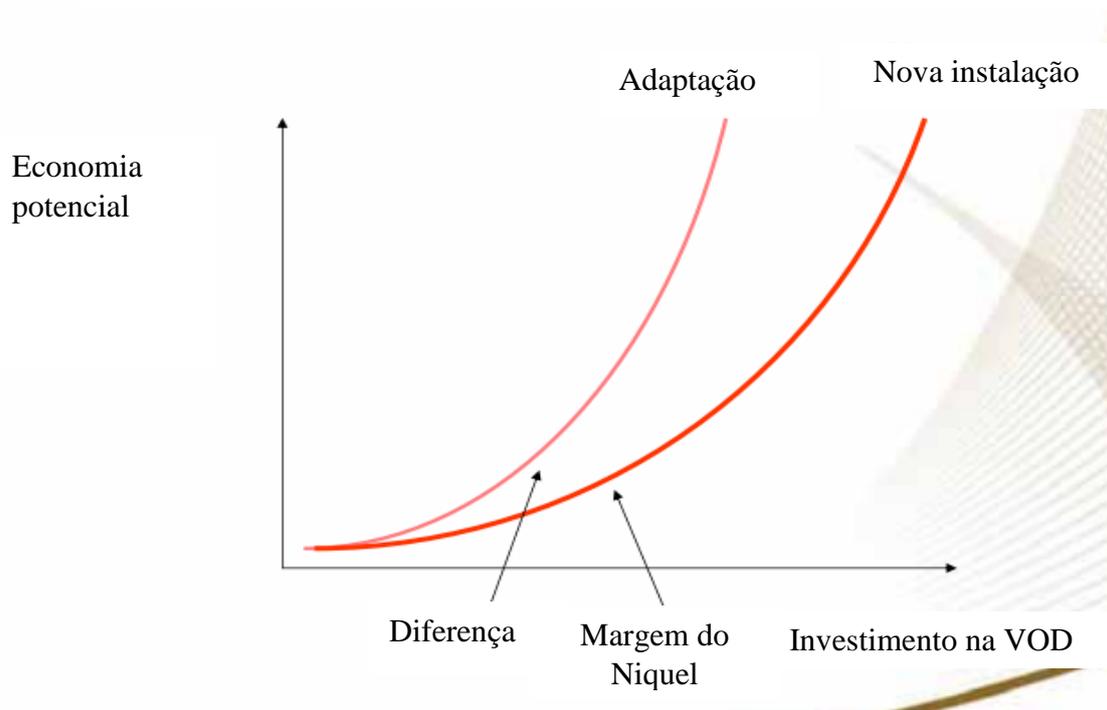


Figura 8 – Gráfico de Economia potencial x Custo de investimento, por meio de aplicação da VOD (Lyle *et al*, 2010).

Costa (2017), por meio do auxílio de medições e simulações no software VentSim, fez um estudo na mina de Ipueira- BA (cromita) da Ferbasa, onde constatou que, com a aplicação da VOD no sistema de ventilação secundário da mina, seria possível diminuir cerca de 95.774 kWh do consumo de energia mensal, diminuindo cerca de 26% do consumo energético e dos custos do sistema secundário, financeiramente a economia mensal seria de R\$ 18.460,00.

Com relação ao aspecto econômico, a implantação de técnicas de ventilação sob demanda exige uma série de investimentos em sensores e equipamentos de automação, além de estudos e testes necessários à otimização do sistema (Costa, 2017).

Pereira (2018) e Maciel (2016) mostram implantação da ventilação sob demanda na Mina Vazante (zinco, Nexa, Brasil).

Pereira (2018) cita que no relatório da empresa Howden (2016) para uma mina com a mesma produção de Vazante, a redução de energia encontrada chegou a 40%, entretanto a quantidade de ar fresco dimensionada é de 800 m³/s. Para outra mina com produção de 3.400 toneladas por

dia, a redução foi de 34%, para uma vazão de aproximadamente 640 m³/s. Porém, em nenhum dos casos foi explicado qual o método de alteração na frequência.

A ventilação da mina Vazante é realizada por sistema de exaustão, por onde o ar desce até chegar aos níveis mais inferiores e começa a retornar por galerias próprias de retornos. A vazão total de ar é de 400 m³/s. A adução acontece pelas rampas principais. A exaustão é realizada inicialmente pelos *raises* secundários, onde o ar ascende até o primeiro nível da mina, onde estão localizados na saída dos poços principais. São três poços de 3,1 metros de diâmetro, que possuem em seus colares um arranjo de três ventiladores de 250 cv.

Pereira (2018) relata que foi utilizado software para interface de operação pelo operador do despacho. Os dados de potência dos ventiladores, coletados e armazenados, são enviados para o banco de dados. Durante um mês coletaram-se dados de 8 ventiladores (a cada 10 segundos ou para variações de potência maiores que 1%) em três corpos em lavra e foi calculada a economia resultante, mostrando que há oportunidades de mais melhoria.

Por meio do uso da VOD nos 9 ventiladores principais da mina de Vazante, percebeu-se que o consumo do sistema de ventilação primário da mina diminuiria aproximadamente 15,3 %, sendo possível diminuir 141.666,66 kWh por mês do consumo de energia, gerando uma economia mensal de cerca de R\$ 34.000,00 (PEREIRA, 2018).

Maciel (2016) também fez testes quanto à aplicação da VOD na mina de Vazante, onde concluiu que desligando 28 dos 38 ventiladores secundários, e reduzindo a velocidade dos 12 ventiladores primários durante a troca de turno o máximo de tempo possível, de maneira que não fosse prejudicial a qualidade do ar, seria possível obter uma economia mensal R\$ 103.081,77 e uma redução de consumo energético de cerca de 15,6%. Como o preço do inversor de frequência havia caído drasticamente, foi possível desligar ou reduzir a velocidade dos ventiladores (sua rotação diminuirá), consumindo menos energia. Em menos de 2 anos, o investimento de R \$ 2,3 milhões seria pago com a redução de energia

A Tabela 5 mostra a relação do local em que a VOD foi aplicada nos estudos de Maciel (2016) e Pereira (2018) na mina de Vazante, com a economia energética e financeira alcançada.

Tabela 5 - Relação do local em que a VOD foi aplicada nos estudos de Maciel (2016) e Pereira (2018) na mina de Vazante.

	PEREIRA	MACIEL
LOCAL DE APLICAÇÃO DA VOD	9 ventiladores principais	28 secundários e 12 primários
CONSUMO MENSAL ANTES (kWh)	926.531,46	3.506.458,50
CONSUMO MENSAL DEPOIS (kWh)	784.864,80	2.957.450,42
ECONOMIA MENSAL(kWh)	141.666,66	549.008,08
ECONOMIA (R\$)	R\$ 34.000,00	R\$ 103.081,77

Na mina de Lamego-MG (ouro) de propriedade da Anglo Gold Ashanti, em parceria com a empresa Devex foi aplicado um *software* para controle das operações chamado de Smart Mine Underground, permitindo com que toda a operação fosse acompanhada por um painel de controle na superfície. Com esse painel de controle, foi feita a aplicação do sistema VOD nos 23 ventiladores da mina, que gerou uma economia mensal de aproximadamente R\$ 40.000,00 (SINFERBASE, 2014).

Também no Brasil, na Mina Cuiabá (ouro, AngloGold Ashanti - Brasil), o sistema de ventilação sob demanda faz com que os ventiladores do subsolo sejam ligados e desligados de acordo com a utilização e a presença de pessoas no local. Ventiladores são acompanhados usando sensores sem fio ao longo das escavações. Dados de campo foram comparados com outras minas e mostraram que a aplicação pode reduzir o consumo significativamente (Seixas, 2012).

A Mina Fazenda Brasileiro (ouro, Equinox Gold, Brasil) fez inversão do fluxo para aumento de eficiência da ventilação. A Mina Ipueira (cromita, Ferbasa, Brasil) fez automatização de circuito primário e secundário e tem dimensionado seu sistema de ventilação em função da potência instalada nos equipamentos (Leite, 2010).

Ainda no Brasil, trabalhos de Costa (2017) e Costa (2019) abordam o tema ventilação sob demanda e custos relacionados às adaptações referentes ao método adotado. O processo de ventilação sob demanda (VOD) consiste em variar o suprimento de ar nas diversas áreas da mina de acordo com as necessidades exigidas em cada setor em um dado momento. As quantidades de ar requeridas sofrem modificações de acordo com as alterações dos diversos fatores como a concentração de gases, temperatura, poeira dentre outros que dependem, por sua

vez, da operação executada, do número de pessoas envolvidas e do tipo e quantidade de equipamentos a diesel solicitados.

Costa (2017) aborda a importância da VOD na economia no consumo de energia utilizando este método estudando a mina Ipueira. Costa (2019) dentro do conceito de VOD analisa o calor liberado na mina subterrânea Córrego do Sítio (ouro), apresentando estudos como a possibilidade de substituir parte da frota por caminhões elétricos que reduziria significativamente a liberação de calor devido a emissão de zero poluentes, mudanças nos procedimentos operacionais e a construção de um poço de exaustão. As simulações realizadas nos estudos apontam para um resultado bastante otimista no que se refere à economia obtida com a redução dos custos pelo sistema de ventilação utilizando a ventilação sob demanda.

A Figura 9 mostra a economia energética mensal gerado pela VOD em estudos realizados em algumas minas.

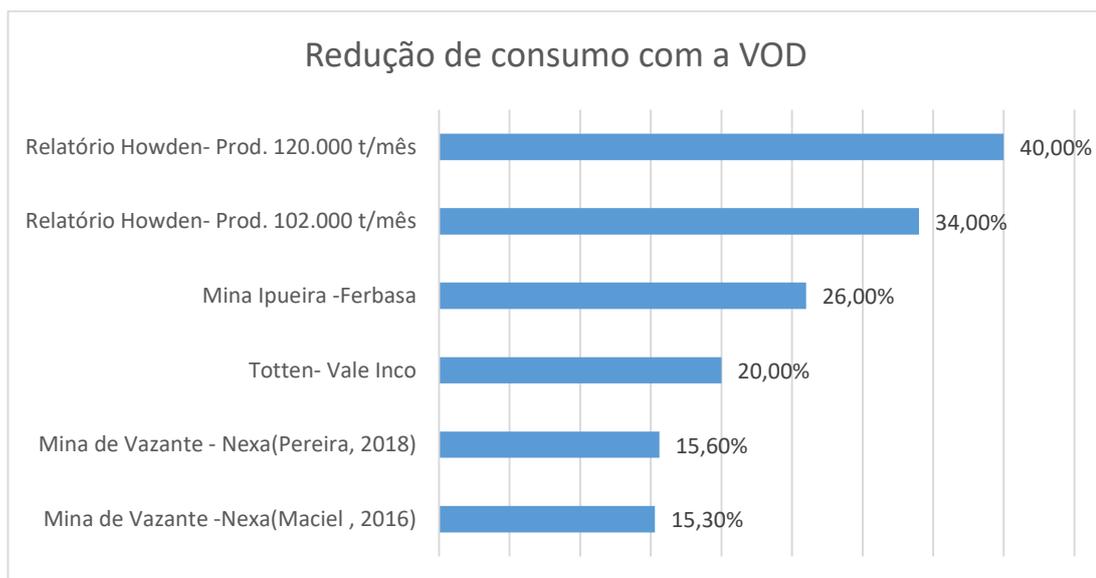


Figura 9 - Redução do consumo energético pela implantação da VOD (Adaptado de PEREIRA, 2018).

5.2 Importância de Medições e Calibragem na Eficiência da Ventilação

Há trabalhos consideráveis sobre a medição de propriedades termo-físicas, como difusividade e condutibilidade térmica, pelos métodos típicos laser-flash e calorimetria de varredura diferencial de fluxo de calor (MIAO *et al.*, 2014; MIAO & ZHOU, 2018, citados por SILVA *et al.*, 2021). Autores concluem que a medição *in situ* continua sendo o melhor método para obter com precisão a condutividade térmica para rochas.

A medição de propriedades, como difusividade e condutibilidade térmica, envolve trabalho considerável e tempo para execução pelos métodos típicos, conforme Masahiro & Yoshmine (2018, citados por SILVA *et al.*, 2021), para o perfeito monitoramento e inclusão de dados em modelos e simulações.

Miao, Li e Chen (2014) realizaram testes em 4 amostras de rochas (granito, granodiorito, gabro e anfibolito granada) obtidas de diferentes regiões do cráton do norte da China, buscando determinar propriedades como difusividade térmica e capacidade de calor específica, por meio de técnicas como a do laser-flash e calorimetria de varredura diferencial de calor respectivamente. A condutividade térmica dessas rochas foi calculada com ajuda dos dados da densidade delas.

Hatakeyama *et al.* (1992, apud SILVA, 2019), por meio de medições com vários anemômetros (medidores de velocidade do ar) espalhados na mina, monitoraram e controlaram a concentração de monóxido de carbono e gás metano em minas de carvão no Japão. Os estudos tinham como objetivo reduzir significativamente o consumo de energia sem negligenciar aspectos da quantidade e qualidade de ar necessários para o melhorar desempenho do sistema, atendendo às normas de segurança e conforto dos trabalhadores, impostas pelos órgãos de fiscalização.

De acordo com Szlajak, Obracaj e Korzec (2016) para que seja feita uma análise precisa da distribuição do fluxo de ar em uma rede de ventilação são necessárias a coleta e a medição de alguns dados como: pressão barométrica nos nós da rede de ventilação; temperatura de ar de bulbo seco e úmido no início e no final da escavação; velocidade.

Xu *et al.* (2018) afirmam que é um desafio para as resistências medidas da via aérea refletirem os valores verdadeiros. Alguns dos erros de medição incluem: erros instrumentais e operacionais; resultados da medição parcial das vias aéreas que são aplicados a todas as vias aéreas ou vias aéreas semelhantes; e resistência empírica que se aplica a vias aéreas de difícil acesso.

A NRM-06 estabelece que medições devem ser realizadas mensalmente para avaliar parâmetros como a velocidade, vazão do ar, temperatura de bulbo seco e úmido. Essas medições devem ser realizadas no mínimo nos seguintes pontos: caminhos de entrada da ventilação; frentes de lavra e de desenvolvimento; ventilador principal.

Segundo Lyle *et al.* (2010) a VOD requer controles de ventiladores e venezianas (para proteger contra o aquecimento), sensores para medir o ambiente de trabalho, “etiquetas” para identificar onde o equipamento está operando e um controle de computador para gerenciar o fluxo de ar.

Hardcastle, Coscis e Connor (2006) realizaram estudos na mina de Creighton (Canadá), que tem 2160 metros de profundidade. Por meio da medição das temperaturas em 5 locais da mina, nas atividades de manuseio do minério, em alguns turnos, obtiveram uma variação de temperatura de 29 a 35,5°C. Por meio da avaliação dos tempos e movimentos chegaram à conclusão que a ventilação auxiliar é necessária continuamente apenas entre a chegada do veículo de carregamento, sua atividade e até 10 minutos após a finalização dela.

Costa (2019), com a ideia de analisar o comportamento específico em termos de particularidades do fluxo de ar e troca de calor na Mina Córrego do Sítio I, coletou dados relativos às condições de ventilação subterrânea, de 2017 a 2019.

Gancev (2006) mostra que, para a avaliação das condições de qualidade do ar e conforto térmico na Mina Cuiabá, foram realizadas medições de variáveis relevantes como: temperatura, velocidade do ar, concentrações de oxigênio e metano em determinados locais no interior da mina. Com o levantamento das características geométricas da mina (comprimento dos níveis de extração, áreas das seções transversais em cada nível), rugosidade das paredes internas, vazão de ar insuflado e a utilização de software, foi possível realizar simulação da diferença de pressão a ser fornecida pelo ventilador principal em função da vazão necessária.

Xu *et al.* (2018) afirmam que a medição da quantidade de fluxo de ar de uma rede de ventilação é mais precisa do que a medição da sua resistência. Essa diferença ocorre porque a resistência é calculada com base na queda de pressão medida e na quantidade de fluxo de ar em uma seção das vias áreas, enquanto o fluxo de ar é medido de maneira direta e com o mínimo de procedimento e erros operacionais.

Os mesmos autores afirmam que a pesquisa de ventilação é um procedimento sistemático para obter dados de pressões e quantidades de ar em vias de acesso e distribuição de fluxo de ar no sistema de ventilação. É comum que a pesquisa de ventilação seja feita de maneira periódica registrando e analisando os obtidos em um relatório de pesquisa de ventilação.

Costa (2017) estudou a viabilidade da implantação de um modelo de ventilação sob demanda na mina subterrânea Ipueira. As simulações foram feitas no software VENTSIM, além delas,

medições de vazão em campo foram feitas, com os ventiladores de Ipueira II ligados e desligados, buscando verificar a discrepância entre os valores simulados e medidos.

Costa (2017) fez uma simulação da ventilação da mina de Ipueira por meio da modelagem computacional, onde visou simular condições físicas, dinâmicas e térmicas para o mês de dezembro de 2018. Após a simulação comparou o modelo com as medições realizadas, visando obter um modelo calibrado. Para a precisão da modelagem, fez a medição de parâmetros e a análise de características dos trechos a serem analisados.

Ryan e De Souza (2017) propuseram uma metodologia que ajudasse a gerenciar o calor no ambiente de trabalho subterrâneo na mina de potássio de Saskatchewan, onde mediram a temperatura da rocha virgem por meio de furos de sonda de 15 metros de profundidade, as medições foram realizadas nas profundidades de 1,5; 3; 6 e 15 metros.

A disponibilidade de instrumentos para medição confiável de parâmetros de ventilação e de redução dos custos, conjugada com a crescente disponibilidade e portabilidade de recursos computacionais, justifica a atenção das empresas no sentido de se projetar sistemas de ventilação de forma mais eficiente. (Silva, 2018)

A Figura 10 mostra uma sala onde o operador acompanha dados da ventilação em tempo real por meio de equipamentos de medição instalados na mina.



Figura 10 - Monitores mostrando parâmetros da rede de ventilação em tempo real (ABB, 2019).

5.3 Importância da Simulação no Dimensionamento dos Sistemas e Aplicação de Melhorias

Machado (2011) afirmou que modelagens computacionais são indispensáveis para prever o comportamento em operação diária como em situações emergenciais, devendo fazer parte do planejamento de mina. Nessa mesma mina, os modelos computacionais dos cenários de produção que foram simulados se mostraram compatíveis para respeitar as normas aplicadas na Anglo Gold Ashanti. A solução de problemas de manutenção em sistemas de ventilação de circuito longo é facilitada devido a aplicações de simulações computacionais.

Xu *et al.* (2018) afirmam que para um sistema de ventilação operar de maneira estável e que não haja distúrbios de fluxo de ar modelos de redes de ventilação de minas, modelos de redes de ventilação de minas vêm sendo amplamente usados na simulação e otimização desses sistemas.

Os mesmos autores afirmam que os modelos são ferramentas para planejar a ventilação antes do começo da mineração; entender as condições atuais da ventilação e prever a condição de maior desenvolvimento ventilatório. Para a construção desses modelos de rede de ventilação são comumente usados softwares como o VnetPC e VentGraph.

Por meio de modelos computacionais é feita a simulação das diversas situações que podem ocorrer durante a operação de um sistema de ventilação, de acordo com a situação que se pretende analisar, são aplicadas mudanças no modelo como: adição de novos mecanismos de ventilação; adição ou remoção de ramos e nós; mudanças na aerodinâmica de parâmetros (pressão, fluxo de ar impulsionado pelo ventilador). Os ajustes realizados buscam avaliar se o novo modelo atende aos requisitos necessários e diagnosticar problemas existentes ou potenciais, de maneira que a equipe responsável pelo projeto obtenha dados concretos para a tomada de decisão (SUVAR *et al.*, 2014).

Para que não haja desordem ou inversão do fluxo de ar, a simulação da ventilação de uma mina deve ser feita antes de serem aplicadas mudanças nos sistemas de ventilação. Esses experimentos são conduzidos de maneira que se obtenha a distribuição de ar na rede após uma modificação na ventilação (XU *et al.*, 2018).

Bing-Rui, Masahiro e Shi-Bao (2018) afirmam que o principal objetivo dos estudos de otimização de uma rede de ventilação de minas é o desenvolvimento de um método que consiga controlar o sistema de ventilação, minimizando o custo de ventilação da mina.

De acordo com Suvar *et al.* (2014) as vantagens do uso de simulações computacionais em redes de ventilação são diversas, podendo ser resumidas da seguinte forma (Asfour e Gadi, 2007; Cioclea *et al.*, 2012; Kocsis *et al.*, 2003):

- Serem ferramentas úteis para tomada de decisões assertivas;
- Explorarem possibilidades para a análises usando como base o modelo virtual tridimensional do sistema já existente, permitindo a equipe de engenharia explorar e avaliar novos métodos operacionais ou não operacionais sem que haja custo envolvido ou parada para realização de testes;
- Serem ferramentas de grande valia tanto na parte de projeto inicial quanto para projetos de reestruturação do sistema de ventilação já existente.

Shirwas e Calizaya (2018) lembram que recirculação de ar é proibida em muitos países mineradores de carvão, pelo medo de que a reutilização do ar de retorno permita o acúmulo de contaminantes do ar no funcionamento. Eles criaram um programa de computador baseado em algoritmo escrito em linguagem C++ que foi implementado com sucesso para determinar a recirculação de ar em uma amostra de rede de ventilação de mina de carvão. Os mesmos creem que esse programa possa ser útil para determinar o ventilador auxiliar ideal de um a rede de ventilação.

Visto que é difícil encontrar recirculação de ar em minas que apresentam sistemas de ventilação complexos, Wang (2018) fez um estudo com base no método da primeira busca em profundidade implementando-o no *software* MATLAB, no qual buscou encontrar a recirculação de fluxos de ar induzida por ventiladores de reforço em um sistema de ventilação complexo da mina de cobre de Dahongshan, localizada na província de Yunnan na China.

As coordenadas do sistema de ventilação foram plotadas no MATLAB e foi procurada a recirculação nos nós onde se encontravam ventiladores. Os resultados foram comparados com a simulação do *software* VENTSIM, onde foi verificado que a recirculação encontrada através do método da primeira busca em profundidade foi confirmada pela simulação de ventilação (WANG, 2018). A Figura 11 mostra o resultado obtido por meio dessa técnica.

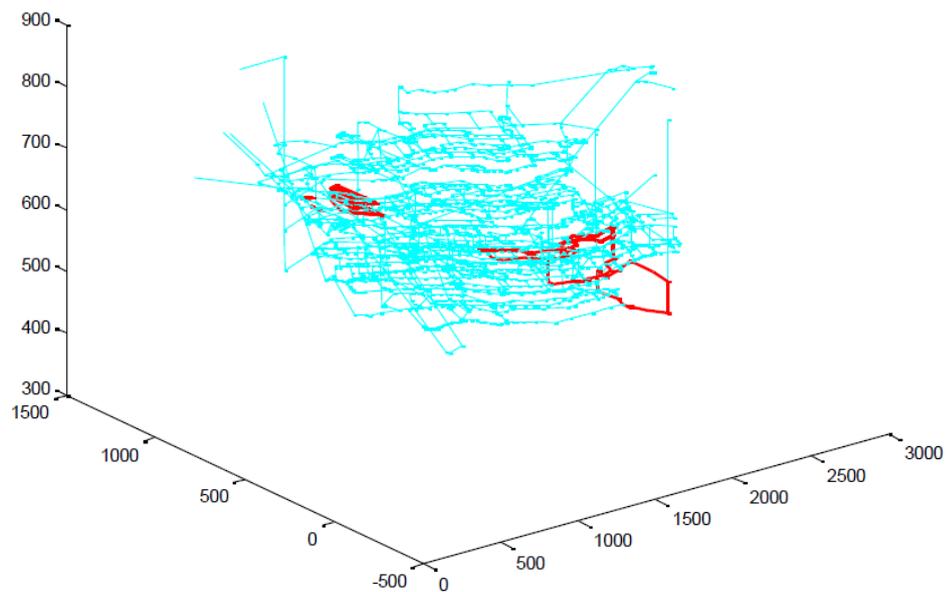


Figura 11 - Sistema de ventilação da mina de cobre de Dahongshan plotado no MATLAB, onde os ramos vermelhos correspondem a pontos de recirculação de ar (WANG, 2018).

Costa (2017) após realizar medições de propriedades da rede de ventilação, utilizou o software VentSim para analisar a viabilidade da implementação da VOD, na mina de Ipueira, onde constatou por meio das simulações que com a aplicação da mesma nos ventiladores do sistema de ventilação secundário da mina seria possível reduzir os custos e o consumo energético em aproximadamente 26%.

Shen e Hai-ning (2011) programaram por meio da linguagem Visual Basic, banco de dados SQL Server e do software de desenho computacional SolidWorks, um programa que permitisse simular e otimizar um sistema de ventilação. Por se tratar de um programa considerado de fácil operação ele já foi aplicado em muitas minas de metais, fornecendo suporte técnico de segurança e se mostrando muito bom para gerenciamento da ventilação, possuindo assim valor prático e perspectiva de aplicação. A Figura 12 mostra o sistema de ventilação de uma mina plotado na interface do programa.

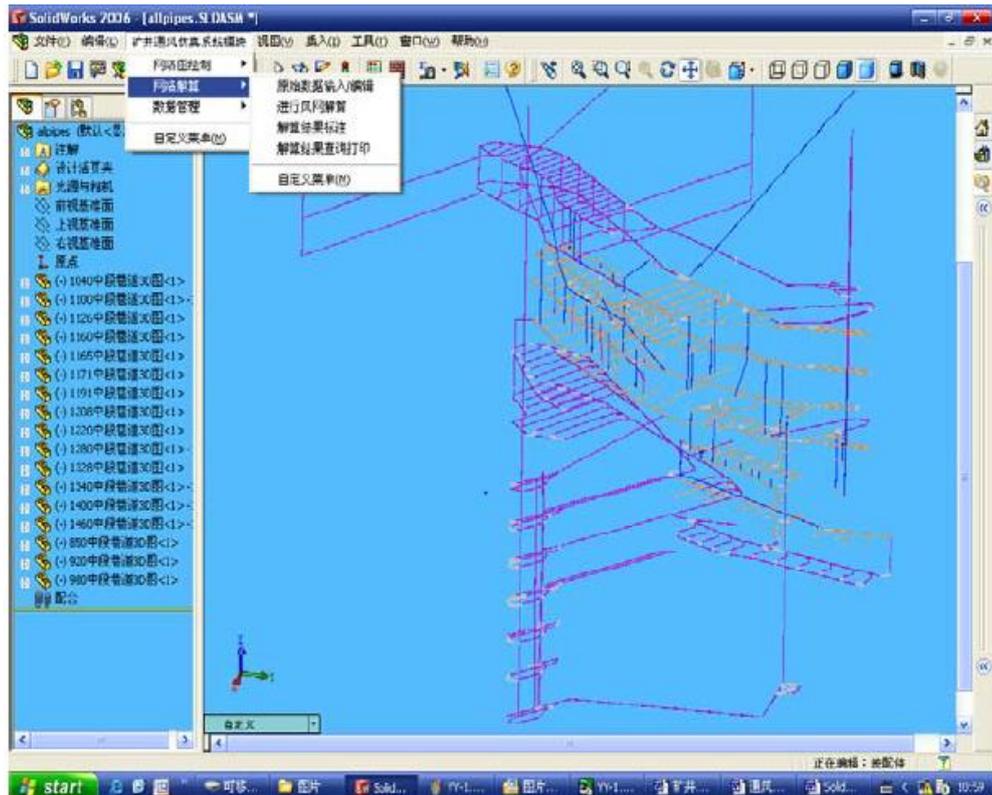


Figura 12 - Interface obtida pelo uso da programação no SolidWoks simulando a ventilação de uma mina hipotética de metal (YUN & HAI-NING, 2011).

Wei, Fangping e Huiqing (2011) realizaram um estudo na mina de Dongai (China) que possui um sistema de ventilação complexo e de gerenciamento difícil. Devido a algumas limitações apresentadas nas simulações obtidas por meio do *software* bidimensional de solução da rede de ventilação utilizado, como a complexidade de navegação e edição de dados em grande escala, foram feitas simulações com o software de ventilação 3D Ventsim para poder simular o sistema de ventilação em tempo real, visando ajudar no entendimento dos trabalhadores no status de ventilação da mina e atender aos requisitos de gestão de segurança da mina.

Os mesmos autores simularam um projeto que visava diminuir a resistência do sistema de ventilação e a pressão do ventilador. A simulação mostrou que após os ajustes feitos a quantidade de ar teve um aumento de $11,4 \text{ m}^3/\text{s}$ e a pressão do ar diminuiu $222,1 \text{ Pa}$. A Tabela 6 mostra os valores de alguns parâmetros da ventilação antes e após o uso da simulação.

Tabela 6 - Parâmetros dos ramos da mina de Dongai antes (2D) e depois (3D) da simulação do projeto (WEI, FANGPING; HUIQING, 2011).

NÚMERO DO RAMO	RESISTÊNCIA DO AR (Ns^2/m^8)		VAZÃO DO AR (m^3/s)		QUEDA DE PRESSÃO (Pa)		ÁREA SECCIONAL (m^2)	
	2D	3D	2D	3D	2D	3D	2D	3D
147	0,0918	0,0818	38,7	52,1	137,3	220,04	7,4	10
130	1,3136	0,024	27,7	26,3	904,3	16,6	5	10
128	4,099	0,004	11	25,8	595,1	2,662	4	12
373	0,0213	0,0113	124,8	88,2	331,9	87,9	12	14
375	0,1273	0,003	45,7	96,2	266	27,63	8,4	20
271	0,2226	0,1126	56,9	60,5	720,9	412,44	11	11

Na mina de Dongai, o uso do Ventsim se mostrou favorável também para:

- Resolver problemas em tempo real, mostrando diversos parâmetros da rede para o usuário;
- Simulação de contaminantes, podendo ajudar na tomada de medidas de resgate de emergência;
- Determinar a origem de fontes contaminantes, como em um incêndio;
- Seleção do ventilador a ser usado e simulação do ajuste de suas pás;
- Detectar a recirculação de ar.

Os sistemas de ventilação devem garantir a ventilação sustentável nas principais vias aéreas da mina em caso de emergências como: queda de blocos; incêndios; explosões; de maneira que garanta saída segura até a superfície para os trabalhadores (KAZAKOV *et al.*, 2014).

De acordo com Machado (2011) os modelos de simulação de redes de ventilação são ferramentas de grande valia para encontrar possíveis falhas em protocolos de emergência e nos projetos básicos dos sistemas de ventilação. Incêndios em minas subterrâneas são situações extremamente perigosas, com o potencial catastrófico de vidas.

O autor fez um estudo por meio do software Ventsim, no qual buscou testar a segurança a da mina de Cuiabá (Anglo Gold Ashanti) relacionada a efeitos de prováveis incêndios, modelando um incêndio hipotético e predizendo o comportamento dos gases tóxicos produzidos por ele.

Haghigath (2014), também por meio do Ventsim, simulou o comportamento do fogo em três locais de uma mina, buscando propor um arranjo para diminuir os riscos de incêndio através das vias áreas. Nesse estudo concluiu que a distância e a direção do fluxo de ar têm um papel fundamental na quantidade de CO e CO₂ disseminada e nas mudanças de temperatura.

6 DISCUSSÃO

A ventilação é operação auxiliar fundamental para o trabalho de lavra e conforto dos trabalhadores, com o aprofundamento das minas subterrâneas vem se tornando cada mais complexo o seu controle.

Os sistemas de ventilação tradicionais tendem a operar com sua capacidade máxima, necessária para manter o suprimento de ar requerido, que por questões de segurança, normalmente é calculado com base em um cenário o mais pessimista possível. Por esse motivo, apresentam forte tendência para um maior consumo de energia em relação aos sistemas de ventilação sob demanda.

Em seu estudo, Haghghat (2014) verificou que, à medida do avanço da lavra, a resistência total da escavação geralmente aumenta, reduzindo a quantidade de ar e aumentando a pressão no sistema.

A automação e digitalização na mineração se refere ao uso de dispositivos (ou sistemas) digitais e dados obtidos por data mining (como aprendizado de máquina e inteligência artificial) para assistir tomadas de decisão, reduzir custos, melhorar a produtividade das operações e transformar as práticas de mineração.

Avanços da automação nos sistemas de ventilação de mina, como a VOD vem dando resultados concretos na diminuição do consumo energético e conseqüentemente economia financeira. A economia varia de acordo com o local de aplicação dessa tecnologia, nos estudos apresentados a aplicação do VOD foi feita tanto no sistema de ventilação principal quanto no secundário, e até mesmo nos dois juntos. Verifica-se pelos trabalhos que economia energética e financeira variou de 15% a 26% do consumo do sistema de ventilação.

Na mina de Lamego-MG da Anglo Gold Ashanti, o uso de um software para controle das operações chamado de Smart Mine Underground, permitiu com que toda a operação fosse acompanhada por um painel de controle na superfície, a aplicação da VOD nos ventiladores da mina gerou uma economia de R\$ 40.000,00 por mês. Na Mina Cuiabá, a aplicação da VOD permitiu o acompanhamento dos ventiladores por meio de sensores sem fio ao longo das escavações.

As medições das propriedades físicas do sistema de ventilação se mostram de grande valia para um monitoramento preciso e inclusão de dados em modelos e simulações de sistema de ventilação (MASAHIRO & YOSHIMINE, 2018).

Por meio da medição da temperatura em 5 locais da mina e da avaliação de tempos e movimentos na mina, Hardcastle, Kosciusko e Connor *et al.* (2006) concluíram que a ventilação auxiliar era desnecessária após 10 minutos da partida do equipamento de carregamento da frente de lavra.

Por meio das medições das vazões em campo e simulação no software Ventism, Costa (2017) estudou a viabilidade da implantação de um modelo de ventilação sob demanda na mina subterrânea de Ipueira.

Dentre as ferramentas de estudo e pesquisa, a simulação permite, dado o número de ventiladores e os parâmetros operacionais requeridos, obter informações mais realísticas da operação sistema de ventilação, considerando os ventiladores usados.

Por meio de seus estudos Xu *et al.* (2018) concluíram que o uso de modelos de rede ventilação de minas subterrâneas fornece auxílio para que os sistemas de ventilação operem de maneira estável e sem distúrbios de fluxo de ar.

De acordo com Suvar *et al.* (2014) os computacionais permitem que sejam feitas simulações de mudanças na rede de ventilação, permitindo avaliar se as alterações a serem aplicadas atendem os requisitos necessários e diagnosticar possíveis problemas.

Verifica-se pelos trabalhos Shriwas e Calizaya (2018) e Wang (2018) que é possível detectar a recirculação de ar por meio de um programa de computador baseado em algoritmo na linguagem C++ e por meio da aplicação dos métodos da primeira profundidade no *software* MATLAB respectivamente.

7 CONCLUSÕES

O sistema de ventilação é fundamental para a operação do empreendimento de mina subterrânea, além disso ele representa uma boa parte dos custos operacionais. Ele exerce o papel de manter a vazão de ar e a temperatura adequadas nas frentes de trabalho, diluir gases e remover contaminantes nocivos à saúde. O aprofundamento das minas e o aumento do seu tamanho faz com que seja necessário um controle cada vez maior da qualidade do ar e que o planejamento e remodelamento desses sistemas seja cada vez mais preciso.

Devido à grande representatividade do sistema de ventilação nos custos do empreendimento de mineração subterrânea, buscou-se no seguinte trabalho fazer um panorama geral de tecnologias, práticas e fatores que podem diminuir seu custo e fazer com que seu planejamento seja mais preciso.

No panorama proposto neste trabalho podem ser obtidas as seguintes conclusões:

- A Ventilação sob demanda (VOD) apresenta uma contribuição representativa para a redução dos custos do sistema de ventilação, aumentando a produção da mina e economizando energia. Pode ser aplicada tanto no sistema de ventilação principal quanto nos sistemas de ventilação auxiliar. Os testes e as simulações feitos em pesquisas de aplicação mostraram resultados consistentes, gerando uma economia energética que variou entre 15 e 26% do consumo do sistema de ventilação no qual foi aplicada.
- As medições periódicas de parâmetros físicos da rede de ventilação e das rochas além de serem exigidas por norma, são importantes para que se mantenham adequadas as condições para o trabalho, aumentando o conforto dos trabalhadores e a eficiência operacional dos equipamentos que se encontram na frente de trabalho. As medições das propriedades da rede de ventilação em pontos específicos também se mostra muito importante para a calibragem de modelos de ventilação, permitindo que esses obtenham resultados mais precisos.
- A simulação de novos sistemas de ventilação e de alterações nos sistemas já existentes é uma técnica que aumenta a assertividade do planejamento do sistema de ventilação. A simulação se mostrou adequada para situações rotineiras de operação, podendo também prever o comportamento do sistema de ventilação em caso de sinistros e detectar a recirculação de ar. As simulações também se mostram importantes aliadas para implementação de melhorias na rede de ventilação como a VOD, estimando a economia energética dessa melhoria e fornecendo dados concretos para a tomada de decisão por parte dos responsáveis técnicos.

- As tecnologias, práticas e fatores estudados no presente trabalho se mostraram muito eficientes nas pesquisas e estudos nos quais foram analisados. Para a obtenção de resultados ainda melhores é recomendado que haja uma combinação entre elas como foi feito em alguns dos trabalhos analisados. Para a análise e posterior implementação de melhorias, cabe a cada empresa de mineração decidir quais são as tecnologias digitais mais relevantes para suas necessidades e tipo de operação.

Acredita-se em avanço importante nessa área nos próximos anos, favorecendo ainda mais o aumento da eficiência e confiabilidade dos sistemas de ventilação em mineração.

As tecnologias e práticas estudadas no trabalho foram aplicadas em minas de diferentes portes, que extraem diferentes tipos de minérios, em diversas situações geológicas (e, portanto, de resistência ao fluxo de ar), tendo assim diferentes composições geológicas, além de possuírem diferentes tamanhos e profundidades. Para pesquisas futuras fica a recomendação de que seja realizado um estudo com uma maior quantidade de trabalhos, possibilitando que a análise dos resultados seja agrupada de acordo com o tipo de minério, profundidade, tamanho e regiões nas quais se encontram os casos estudados.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABB, 2019. Disponível em: <https://new.abb.com/mining/mineoptimize/digital-applications/advanced-process-control/abb-ability-ventilation-optimizer>.

ABB. **Automação de Minas**. Disponível em: <https://new.abb.com/mining>. Acesso em 2021.

ACUÑA, E. I.; ALVAREZ, R. R.; HARDCASTLE, S. G. **A Theoretical Comparison of Ventilation on Demand Strategies for Auxiliary Mine Ventilation Systems**, IMVC, 2014.

ASFOUR O. S.; GADI M. B. A comparison between CFD and Network models for predicting wind-driven ventilation in buildings. **Building and Environment**, v. 42, pp: 4079–4085, 2007.

BONETTI, B. **Caracterização do ambiente de mina subterrânea de carvão de jazida sulcatarinense**. Dissertação de Mestrado, PUC-RS, 2017.

BOTELHO, A.; GRIEBELER, E. E.; NEVES, E.; WARNERY, E.; PHILIPPE, J. 2011. **Projeto de pré-viabilidade de um depósito subterrâneo de ouro**. Monografia de Graduação, UFRGS, 2011.

CANADIAN MINING JOURNAL. 2019. Disponível em: <http://www.canadianminingjournal.com/features/abb-discusses-the-advantages-of-ventilation-on-demand/>.

CARDOSO, R. R. **Verificação do sistema de ventilação em mina subterrânea dividido em 3 estágios de mineração para mina de carvão baseado na mina Leão II-RS**. Engenharia Mecânica, UFRGS, 2014.

CHARBEL, P. A. **Gerenciamento de risco aplicado à diluição de minério**. Tese de Doutorado. Engenharia Civil e Ambiental, UnB, 2015.

CHATTERJEE, A. A.; ZHANG, L.; XIA, X. Optimization of mine ventilation fan speeds according to ventilation on demand and time of use tariff. **Applied Energy**, v.146, p.65-73, 15 May 2015.

CIOCLEA, D.; LUPU, C.; TOTH, I.; GHERGHE, I.; BOANTĂ, C.; RĂDOI, F. Fast network connections for ensuring decision operativity in mining ventilation. **Environmental Engineering and Management Journal**, v. 11, pp: 1225-1228, 2012.

CIPEC. **BENCHMARKING THE ENERGY CONSUMPTION OF CANADIAN UNDERGROUND BULK MINES**. ISBN 0-662-39539-5, Cat. No. M144-71/2005E, p.19-49, 2005.

COSTA, J. C. A. **Estudos para Implantação de um modelo de ventilação sob demanda no complexo mineiro de Ipueira – Ferbasa, município de Andorinha – Bahia.** Tese de Doutorado, Engenharia de Processos, UFCG, 2017.

COSTA, L. V. **Análise via simulação da influência da temperatura na produtividade e nos custos de ventilação em mina subterrânea.** Tese de Doutorado, UFOP, 2019.

COSTA, L. V.; SILVA, J. M. Cost saving electrical energy consumption in underground ventilation by the use of ventilation on demand. **Mining Technology- Transactions**, p.1-8, 2019.

COSTA, L. V.; SILVA, J. M. Strategies used to control the costs of underground ventilation in some Brazilian mines. **REM, International Engineering Journal**, Ouro Preto, v.73, n.4, p.555-560, 2020b.

COSTA, L. V.; SILVA, J. M.; SANTOS, D. T. An Overview on Cost Control Techniques Used in Underground Ventilation in Brazil. Acosta, M.J. (ed.). **Advances in Energy Resource**, v.33, Chapter 7, p.177-190. Nova Science Publishers, 2020a.

DARLING, P. **Mine Ventilation.** SME, p.1577-1594, 2011.

DE SOUZA. 2015. Disponível em: <http://www.airfinders.ca/wp-content/uploads/2015/05/Cost-Saving-Strategies-in-Mine-Ventilation.pdf>.

DE VILLIERS *et al.* Evaluating the impact of auxiliary fan practice, **IJMST**, v.29, n.6, p.933-941. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095268618302891>.

DUDAR, O. I.; DUDAR, E. S. Analysis of Mine Ventilation Network by 1D FEM: Simulation of Fans and Natural Draught. International science and technology conference "Earth science", **IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science**, v. 272, 022158, IOP Publishing, 2019.

GANCEV, B.F. **Avaliação de condições de qualidade do ar em mina subterrânea.** Engenharia Mecânica- EPUSP. Monografia de Graduação. 2006.

LYLE, G.; BULLOCK, K.; DASYS, A.; HARDCASTLE. **Ventilation on Demand ProjectMDEC Conference.** 2010

HAGHIGHAT, A. Analysis of a ventilation network in a multiple fans limestone mine. (2014). Masters Theses. 7299. https://scholarsmine.mst.edu/masters_theses/7299.

HARDCASTLE, S. G.; KOSCIS, C.; O' CONNOR, D. **Justifying ventilation on demand in a Canadian mine and the need for process based simulations.** 12th U.S. North American Mine Ventilation Symposium. p.15 – 21, 2006.

HARTMAN, H. L.; MUTMANSKY, J. M.; RAMANI, R. V.; WANG Y. J. **Mine Ventilation and Air Conditioning**. John Wiley & Sons, Inc. 3° ed. 1997.

HOWDEN. **SmartEXEC™ Ventilation-on-Demand**. Disponível em: <[https://www.howden.com/Brochures/Howden%20Ventilation%20on%20Demand%20\(VOD\)%20Case%20Study.pdf?fbclid=IwAR2UVQEqZbbViH3X3TuWFA7Sjd9HRarDsk86G6WFNPKAocRpdpVT8jp9KLk](https://www.howden.com/Brochures/Howden%20Ventilation%20on%20Demand%20(VOD)%20Case%20Study.pdf?fbclid=IwAR2UVQEqZbbViH3X3TuWFA7Sjd9HRarDsk86G6WFNPKAocRpdpVT8jp9KLk)>. Acesso em: 12 nov. 2018.

HUAMING, A.; BIN, L.; LIXING, L. Positioning Mine Ventilation Recirculation Winds Based on the Depth-First Search Method. **Procedia Engineering**, v. 24, pp:400–403, 2011.

KAZAKOV, B. P.; SHALIMOV, A. V.; TRUSHKOVA, N. A. Assessment of emergencies in return air system design. **J. Min. Sci.**, v. 50, pp: 137–141, 2014, <https://doi.org/10.1134/S1062739114010190>.

KOCSIS, C.K.; HALL, R.; HARDCASTLE, S.G. The integration of mine simulation and ventilation simulation to develop a 'Life-Cycle' mine ventilation system. **Application of Computers and Operations Research in the Minerals Industries**, South African Institute of Mining and Metallurgy, Online at: http://www.saimm.co.za/Conferences/Apcom2003/22_3-Kocsis.pdf, 2003.

KOPPE, J. C.; MELFI, E. M. *et al.* Recursos Minerais no Brasil: problemas e desafios, p.254. ABC- Vale. Rio de Janeiro. 2016.

LI *et al.* **Ventilation and environmental control of underground spaces: a short review**. E3S Web of Conference, 111, 5p, 2019.

LI, BING-RUI; MASAHIRO, I.; SHEN S. Mine Ventilation Network Optimization Based on Airflow Asymptotic Calculation Method. **Journal of Mining Science**, v. 54, pp:99–110, 2018.

LUO, W.; XIE, X.; XIAO, H.; CUI, C.; YIN, X.; SU, M.; WANG, T.; LI, J.; TAN, X. Reliability calculation of mine ventilation network. 2014 ISSST”, 2014 International Symposium on Safety Science and Technology, **Procedia Engineering**, v. 84, pp: 752 – 757, 2014.

MACHADO, H. G. **Gestão de riscos em minas subterrâneas: avaliação da ventilação em minas profundas**. 2011. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 209f, 2011.

MARTINS, C.F.V. **Avaliação das Normas Reguladoras de Mineração para Minas Subterrâneas no Brasil e da Legislação Mineral Brasileira para Segurança em Subsolo**. Dissertação de Mestrado, UFOP, 2017.

MASAHIRO, I; YOSHMINE, K. In situ measurement of thermal Conductivity and Diffusivity of Rock. Hurtado et al. (eds). Proc. **International Symposium in Mine Ventilation**, 2018.

MCPHERSON, M. J. **Subsurface Ventilation and Environmental Engineering**. New York, New York: Chapman & Hall, 1993.

MIAO, S.; LI, H.; CHEN, G. Temperature dependence of thermal diffusivity, specific heat capacity, and thermal conductivity for several types of rocks. **Journal of Thermal Analysis & Calorimetry**, s. l., v. 115, n. 2, p. 1057–1063, 2014.

MUTMANSKY, J.M.; HARDCASTLE, S.G.; RAMANI, R.J. **Justifying VOD in a Canadian mine**. 11th US National American Mine Ventilation Symposium, p.15-27, 2006.

NIE, X.; WEI, X.; LI, X.; LU, C. Heat Treatment and Ventilation Optimization in a Deep Mine. **Advances in Civil Engineering**, 2018. Doi:1-12. 10.1155/2018/1529490.

NRM-06: Norma Regulamentadora 06: Ventilação. 2021. Disponível em: <https://www.diariodasleis.com.br/legislacao/federal/229541-normas-reguladoras>.

NRM22: Norma Regulamentadora 22: Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração. 2021. Disponível em: <http://www.guiatrabalhista.com.br/legislacao/nr/nr22.htm>.

ORTIZ. MIN110- Condicionamento de Minas. Notas de Aula Disciplina. Condicionamento de Mina 2019/2.

PAIVA, G. 2015. **Aplicação de tecnologia de informação e automação em minas subterrâneas: desafios e perspectivas**, EPUSP, 2015.

PEREIRA, M.R. **Estudo dos principais parâmetros para a implantação do sistema de ventilação em minas subterrâneas: uma aplicação no software VnetPC**. 2013. 60f. Monografia de Graduação em Engenharia de Minas. Universidade do Estado de Minas Gerais, 2013.

PINTO, P.C.; COSTA, J.F.C.L.; KOPPE, J.C.; SALVADORETTI, P.; KURCEWICZ, J.A.; MONTEDO, E. D. Construção de um modelo computacional para o circuito de ventilação da Mina Esperança. **REM, International Engineering Journal**, Ouro Preto, v.56, n.4, p. 243-248, 2003.

PINTO, T.A.M. **Consequências do Uso de Carregadeiras Tipo LHD Elétricas em Minas Subterrâneas**. Monografia de Graduação, UFOP, 2018.

RAMJACK. Disponível em: <https://ramjacktech.com/mining-resources-articles/ventilation-demand-vod-reduce-operating-costs/>, 2011.

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

SHRIWAS, M.; CALIZAYA, F. Automation in detection of recirculation in a booster fan ventilation network. **International Journal of Mining Science and Technology**, v.28(3), pp.513-517, 2018.

SILVA, J. M. Notas de Aula: MIN212- Projeto de Lavra Subterrânea. 2018.

SILVA, J. M.; SANTOS, R. C. P.; FILHO A. O. S. Expansion of human resources and infrastructure in mine ventilation in Brazil. **II International Symposium in Mine Ventilation of Southamerica**, Lima – Peru, 2021.

SINFERBASE. Redução de custos operacionais em Lamego. Disponível em: <http://www.sinferbase.com.br/noticias/reducao-de-custos-operacionais-em-lamego>., 2014.

ŞUVAR, M. C.; LUPU, C.; ARAD, V.; CIOCLEA, D.; PĂSCULESCU, V. M.; MIJA, N. Computerized simulation of mine ventilation networks for sustainable decision making process. **Environmental Engineering and Management Journal**, v.13, n. 6, pp:1445-1451, 2014.

SZLAŻAK, N.; OBRACAJ, D.; KORZEC, M. Influence of applying additional forcing fans for the air distribution in ventilation network. **Management Systems in Production Engineering**, v.23, n.3, p.163-171, 2016.

TRAN-VALADE, T.; ALLEN, C. **Ventilation-On-Demand key consideration for the business case**, Canadian Institute of Mining (CIM) Convention: proceedings of the Toronto 2013 CIM Conference, Toronto, Canada. 2013.

WANG, L. Searching underground fan induced recirculation in a complicated mine ventilation network. **Civil Engineering Journal**, n.1. 2018.

WEI, F.; FANGPING, Z.; HUIQING, L. The Use of 3D Simulation System in Mine Ventilation Management. **Procedia Engineering**, v. 26, pp: 1370-1379, 2011.

WENGUI, L.; XIANPING, X.; HOUZAO, X.; CHAO, C.; XIAOYU, Y.; MEIWEI, S.; TINJUN, W.; IANGONG, J.; XINGYU, T. Reliability Calculation of Mine Ventilation Network. **Procedia Engineering**, v.84, p.752-757, 2014.

Xu, G.; Huang, J.; Nie, B.; Chalmers, D.; Yang, Z. **Calibration of Mine Ventilation Network Models Using the Non-Linear Optimization Algorithm Energies**, v.11, n.1, p.31, 2018.

XU, G.; HUANG, J.; NIE, B.; CHALMERS, D.; YANG, Z. **Calibration of Mine Ventilation Network Models Using the Non-Linear Optimization Algorithm Energies**, v.11, n.1, p.31, 2018.

YUN, S.; WANG, H. Study and application on simulation and optimization system for the mine ventilation network. **Procedia Engineering**, v. 26, pp: 236 242, 2011.