

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Guilherme da Silva Prado

**GERENCIAMENTO INTEGRADO E DESENVOLVIMENTO EFICIENTE DE
SISTEMAS DE VENTILAÇÃO EM MINAS SUBTERRÂNEAS**

Belo Horizonte

2023

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais

Guilherme da Silva Prado

GERENCIAMENTO INTEGRADO E DESENVOLVIMENTO EFICIENTE DE
SISTEMAS DE VENTILAÇÃO EM MINAS SUBTERRÂNEAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Engenharia de Minas da
Universidade Federal de Minas Gerais como
parte integrante dos pré-requisitos para a
obtenção do título de bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Michel Melo Oliveira

Belo Horizonte

2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade que me foi dada, minha gratidão perdurará por toda a minha vida pelo seu sustento nas horas difíceis e provisão nos momentos que eu precisei de sua mão em minha vida.

Agradeço à minha mãe e à minha avó, Rita e Maria José, por terem me ajudado e feito tantos sacrifícios por mim até aqui. Grande parte da minha formação deve-se a elas. Também agradeço a toda a minha família pela ajuda e orações pela minha vida, em especial ao meu tio Daniel. Aos meus queridos amigos Pedro, Vinícius e Samuel, sou grato pelo companheirismo durante todo esse tempo. Vocês são parte da minha família.

Meu agradecimento especial ao meu orientador, Michel Melo, cuja orientação foi fundamental em meu aprendizado e crescimento acadêmico.

Gratidão ao Renzo e Reinaldo, colegas de trabalho na Minere Engenharia Ltda, pelo aprendizado, companheirismo e amizade valiosa.

Agradeço também a minha futura esposa Viviane Neres por todo carinho, companheirismo e amizade incondicional.

RESUMO

Este trabalho apresenta os principais fatores a serem considerados no desenvolvimento de sistemas de ventilação. São relacionados os indicativos mais relevantes e aceitos internacionalmente, como por exemplo, os limites de exposição a agentes que podem ser nocivos à saúde do trabalhador e a correlação das condições do ambiente subterrâneo com a eficiência produtiva do colaborador. A ventilação por sua vez é fundamental para minimização e controle desses riscos. Além desses parâmetros, foi discutida a fundamentação legislativa aplicável a projetos de sistemas de ventilação no Brasil, notadamente a Norma Regulamentadora 22 (NR 22) e Norma Reguladora de Mineração (NRM 06). Além disso, foram apresentadas outras normas como: NR 15 e 17, bem como a importância das NRMs em projetos minerários. Foram apresentados também os principais tipos de ventiladores e equipamentos utilizados na construção e desenvolvimento de sistemas de ventilação. Entre eles, destacam-se os ventiladores centrífugos, os ventiladores axiais, e as máquinas de perfuração ascendente, tanto verticais quanto semiverticais. Dentre os tipos de ventiladores apresentados, o mais utilizado atualmente é o do tipo axial, pois reduz as perdas por choque, e consequente, o consumo de energia. Além disso, este trabalho incluiu as definições e critérios gerais para a obtenção e análise da curva característica de uma mina e da curva característica de um ventilador. Também foi enfatizada a importância da correlação entre essas curvas na escolha do ventilador, considerando características como eficiência, potência e pressão. Adicionalmente, o trabalho abordou técnicas voltadas para a economia no fluxo de ar, enfocando na ventilação sob demanda (VOD), uma abordagem para otimizar o uso do ar em minas subterrâneas. Adicionalmente, o estudo detalhou uma metodologia para o planejamento de sistemas de ventilação, aplicável principalmente nas fases conceituais ou de viabilidade de um projeto. Por fim, realizou-se uma comparação entre a NRM 06 e a NR 22, destacando as principais diferenças na determinação da vazão de ar fresco em ambientes subterrâneos.

Palavras-Chave: sistema de ventilação, eficiência operacional, normas reguladoras, mina subterrânea.

ABSTRACT

This work presents the main factors to be considered in the development of ventilation systems. It outlines the most relevant and internationally accepted indicators, such as the exposure limits to agents that can be harmful to workers' health and the correlation of underground environmental conditions with the employees' productive efficiency. Ventilation, in turn, is fundamental for minimizing and controlling these risks. In addition to these parameters, the legislative foundation applicable to ventilation system projects in Brazil, notably the Regulatory Standard 22 (NR 22) and Mining Regulatory Standard (NRM 06), was discussed. Furthermore, other standards such as NR 15 and 17 were presented, as well as the importance of NRMs in mining projects. The main types of fans and equipment used in the construction and development of ventilation systems were also presented. Among them, centrifugal fans, axial fans, and vertical and semi-vertical ascending drilling machines stand out. Among the types of fans presented, the axial type is currently the most used, as it reduces shock losses, and consequently, energy consumption. Moreover, this work included the definitions and general criteria for obtaining and analyzing the characteristic curve of a mine and the characteristic curve of a fan. The importance of correlating these curves in the choice of the fan, considering characteristics such as efficiency, power, and pressure, was also emphasized. Additionally, the work addressed techniques aimed at saving air flow, focusing on demand ventilation (VOD), an approach to optimize air use in underground mines. Furthermore, the study detailed a methodology for planning ventilation systems, applicable mainly in the conceptual or feasibility phases of a project. Finally, a comparison was made between NRM 06 and NR 22, highlighting the main differences in determining the flow of fresh air in underground environments.

Keywords: ventilation system, operational efficiency, regulatory standards, underground mine.

FIGURAS

Figura 1- Rendimento do trabalhador em função da temperatura laboral	16
Figura 2 - Estratificação teórica de gases em uma galeria de mineração	26
Figura 3 - Módulo inteligente de monitoramento.....	28
Figura 4 - Ventilador tipo centrífugo.....	32
Figura 5 - Demostra as configurações típicas de instalação para ventiladores axiais	33
Figura 6 - Ventilador axial tipo vertical	33
Figura 7 - Raise Boring Machine	35
Figura 8 - Processo de perfuração RBM	36
Figura 9 - Perfuração com o RBM posicionado no nível inferior	37
Figura 10 - Sistema de ventilação forçada tipo central	44
Figura 11 - Sistema de ventilação forçada tipo lateral ou de limite	45
Figura 12 - Curva teórica característica da mina	49
Figura 13 - Procedimento experimental para obtenção da curva característica do ventilador ..	50
Figura 14 - Combinação das características da mina com as características do ventilador	51
Figura 15 - Vazão de ar em função do consumo de explosivos pela NRM 06 e NR 22	59

TABELAS

Tabela 1 - Composição do ar seco	13
Tabela 2 - Limites de tolerância para concentração de gases em mina subterrânea	20
Tabela 3 - Efeitos na saúde humana decorrentes da exposição a gases	24
Tabela 4 - Principais gases a serem considerados no contexto da ventilação subterrânea.....	25
Tabela 5 - Densidade relativa de diferentes gases em relação ao ar.....	26
Tabela 6 - Fator de produção em função do método de operação	39
Tabela 7 - Detalhamento dos equipamentos a diesel considerados	60
Tabela 8 - Critérios de projeto gerias considerados	60
Tabela 9 - Cálculo de vazão de ar fresco pela NRM 06	61
Tabela 10 - Cálculo da vazão de ar fresco pela NR 22.....	62

LISTA DE SÍMBOLOS

cv	Cavalo-vapor
HP	Horse power
k	Fator de atrito
kW	Quilowatt
m³	Metro cúbico
min	Minuto
<i>p</i>	Pressão friccional
<i>Q</i>	Taxa de fluxo de ar

ABREVIATURAS E SIGLAS

atm	Atmosfera
ANM	Agência Nacional de Mineração
CH₄	Metano
CAPEX	Capital expenditure
SMA	Sistema de Monitoramento Atmosférico
DOU	Diário Oficial da União
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
MTb	Ministério do Trabalho
MTE	Ministério do Trabalho e Emprego
OPEX	Operacional expenditure
PAE	Plano de Aproveitamento Econômico
PCIAM	Plano de Controle de Impacto Ambiental na Mineração
PFM	Plano de Fechamento de Mina
PL	Plano de Lavra
RAL	Relatório Anual de Lavra
RBM	Raise Boring Machine
ROM	Run of Mine
SMA	Sistema de Monitoramento Atmosférico
VOD	Ventilação sob Demanda

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.2	Condições atmosféricas em minas subterrâneas.....	13
3.3	Efeitos fisiológicos do calor	14
3.4	Gradiente geotérmico	16
3.5	Legislação brasileira aplicável em sistemas de ventilação	16
3.5.1	Conceituação geral	16
3.5.2	Normas regulamentadoras	18
3.5.3	Normas reguladoras de mineração	20
3.6	Controle da qualidade do ar em minas subterrâneas	22
3.7	Limites de exposição ocupacional e efeitos na saúde.....	23
3.8	Monitoramento do sistema atmosférico subterrâneo	27
3.9	Determinação do fator de atrito	28
3.9.1	Determinação do fator de atrito analogia	28
3.9.2	Determinação do fator de atrito por método empírico	29
3.9.3	Determinação do fator de atrito por meio de dados geométricos	29
3.10	Perdas de pressão por choque	30
3.11	Equipamentos envolvidos na ventilação de mina subterrânea	31
3.11.1	Tipos de ventiladores e equipamentos usados na ventilação.....	31
3.11.2	Equipamento de escavação de aberturas verticais e semiverticais	34
3.12	Ventilação de minas.....	37
3.12.1	Terminologias essenciais de sistemas de ventilação	37
3.12.2	Ventilação principal.....	38
3.12.3	Ventilação secundária.....	46
3.12.4	Curva característica da mina.....	47
3.12.5	Curvas características de ventiladores	49
3.12.6	Combinação das características da mina com o ventilador	50
3.12.7	Localização do ventilador e vias de ventilação principais	51
3.12.8	Dispositivos de controle de fluxo de ar	52
3.12.9	Ventilação sob demanda	53

3.12.10	Custos de energia da ventilação	54
3.12.11	Economia de fluxo de ar	55
3.13	Metodologia tradicional para planejamento de sistemas de ventilação.....	56
4	COMPARAÇÃO DA NR 22 E NRM 06 PARA VENTILAÇÃO	58
4.1	Vazão em função do consumo de explosivos	58
4.2	Comparação da NRM 06 e NR 22 na determinação de vazão de ar fresco.....	59
5	CONCLUSÃO.....	63
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

1 INTRODUÇÃO

O gerenciamento eficiente do sistema de ventilação em minas subterrâneas desempenha um papel crucial na segurança e produtividade das operações mineradoras. A qualidade do ar no ambiente laboral é fundamental para a saúde e bem-estar dos trabalhadores, além de influenciar diretamente na eficiência das atividades na mineração. Nesse contexto, é essencial adotar um sistema de ventilação integrado e eficiente, que possa garantir a adequada circulação do ar, remoção de contaminantes e controle da temperatura e umidade.

Além de assegurar o bem-estar dos trabalhadores, uma gestão eficiente do sistema de ventilação busca minimizar os custos envolvidos, incluindo os de capital (CAPEX) e operacionais (OPEX). Aspectos como a seleção adequada de equipamentos, eficiência energética e dimensionamento adequado dos sistemas de ventilação devem ser levados em consideração desde a concepção do projeto de ventilação.

O desenvolvimento de sistemas de ventilação pode ser da forma tradicional ou, como é mais comum atualmente, com o auxílio de softwares específicos para o setor mineral. Apesar das técnicas tradicionais, ou seja, sem a dependência específica de meios computacionais serem bem desenvolvidas, quando comparadas às metodologias baseadas em computação, apresentam menor versatilidade, detalhamento e menor índice de exatidão (MCPHERSON, 2009).

No Brasil, a principal norma que regulamenta os critérios para projetos de sistemas de ventilação em minas subterrâneas é a NR 22 (GANCEV, 2006). Entretanto, existem normas complementares, tais como a NR 15 e a NR 17. Além disso, a Agência Nacional de Mineração (ANM) estabelece outras diretrizes através das Normas Reguladoras de Mineração, incluindo a NRM 06, que trata especificamente da ventilação em minas subterrâneas. Assim, todo projeto de ventilação deve partir do atendimento da legislação aplicável.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é avaliar as principais premissas a serem consideradas em um projeto de ventilação de mina subterrânea no estágio de pré-viabilidade. Isso envolve analisar as abordagens e parâmetros de planejamento mais comuns adotados internacionalmente e compará-los com as especificidades da legislação brasileira.

A fim de atingir o objetivo principal, pretende-se:

- Levantar os principais fatores que influenciam no ambiente laboral de minas subterrâneas;
- Analisar a legislação brasileira pertinente ao setor mineral, com ênfase nas normas e regulamentos relacionados à ventilação de minas subterrâneas;
- Levantar as principais técnicas e equipamentos utilizados em sistemas de ventilação subterrânea, destacando aqueles reconhecidos por sua eficiência;
- Comparar a NRM 06 e NR 22 que diz respeito à determinação de ar fresco necessário em minas subterrâneas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Natureza e composição do ar

O principal interesse no ambiente subterrâneo de uma mina, no que diz respeito à ventilação, é a quantidade e a qualidade do ar, que são cruciais para a segurança e saúde dos trabalhadores. Termodinamicamente, o ar pode ser considerado essencialmente como uma mistura de ar seco e vapor d'água, com o comportamento desta mistura influenciando diretamente a eficácia da ventilação. Quimicamente, a composição do chamado ar seco ao nível do mar, ou seja, a 1 atm, inclui principalmente nitrogênio e oxigênio, com traços de outros gases como dióxido de carbono e argônio, podendo ser representada pela Tabela 1 a seguir, que detalha os percentuais volumétricos e ponderais de cada componente (HARTMAN *et al.*, 1997).

Tabela 1 - Composição do ar seco

Gás	Vol (%)	Peso (%)
Nitrogênio (N)	78,09	75,55
Oxigênio (O)	20,95	23,13
Dióxido de Carbono (CO ₂)	0,03	0,05
Argônio (Ar), outros gases	0,93	1,27

Fonte: HARTMAN *et al.* (1997)

Para cálculos que envolvem o controle de qualidade do ar, é comum assumir o ar seco com as seguintes proporções:

- Oxigênio: 21% em proporção no ar;
- Nitrogênio e demais gases inertes: 79%.

3.2 Condições atmosféricas em minas subterrâneas

Conforme descrito por Thakur (2019), o ambiente atmosférico em minas subterrâneas possui muitos poluentes. Esses poluentes podem ser divididos principalmente em duas classes: sólidos respiráveis e gases como o metano e dióxido de carbono. Nesse sentido, a provisão de um ambiente de ar adequado para promover a saúde, segurança e conforto dos trabalhadores na mineração sempre foi e continuará a ser essencial para o sucesso dos empreendimentos mineiros.

Ainda que as condições de um ambiente de trabalho adequado variem de país para país, é comum que haja um fornecimento de ar circulante mantendo pelo menos 19,5% de concentração de oxigênio nas áreas de trabalho. Adicionalmente, o controle da concentração de sólidos suspensos, poluentes gasosos, temperatura e umidade deve estar em conformidade com os limites estabelecidos pela legislação.

No Brasil, em conformidade com o que é apresentado pela Norma Regulamentadora 22 (NR 22) e pela Norma Reguladora de Mineração 06 (NRM 06), estabelece-se que nos locais onde pessoas estiverem transitando ou trabalhando, a concentração de oxigênio no ar não pode ser inferior a 19%, demonstrando uma similaridade com o que é apresentado por THAKUR, (2019).

Em termos gerais, o gerenciamento de parâmetros como a temperatura no ambiente de trabalho e a umidade tende a não ser um problema para minas de carvão; entretanto, no caso de minas metálicas profundas, como as de exploração de minério (ROM: *Run of Mine*¹) de prata, cobre e ouro, apresenta dificuldades no controle da temperatura ambiente e da umidade.

3.3 Efeitos fisiológicos do calor

O corpo humano utiliza um sistema regulatório para manter sua temperatura quase constante em 37,0 °C. Esse processo é controlado pelo sistema nervoso por meio de nervos sensoriais próximos à superfície da pele, que possuem a função de identificar mudanças nas condições do ambiente e na temperatura corporal. Esse mecanismo mantém os processos de perda e ganho de calor em equilíbrio para prevenir efeitos térmicos nocivos, isto é, tensão térmica ao corpo (HARTMAN *et al.*, 1997).

Segundo Hartman *et al.*, (1997), durante atividades laborais, o corpo humano funciona como motor térmico com baixa eficiência. A medida da resposta e adaptação do corpo ao estresse térmico, seja ele de origem ambiental ou metabólica, é denominada tensão térmica. Quando o estresse térmico aumenta, o corpo tenta manter o equilíbrio térmico através de mecanismos de transferência de calor.

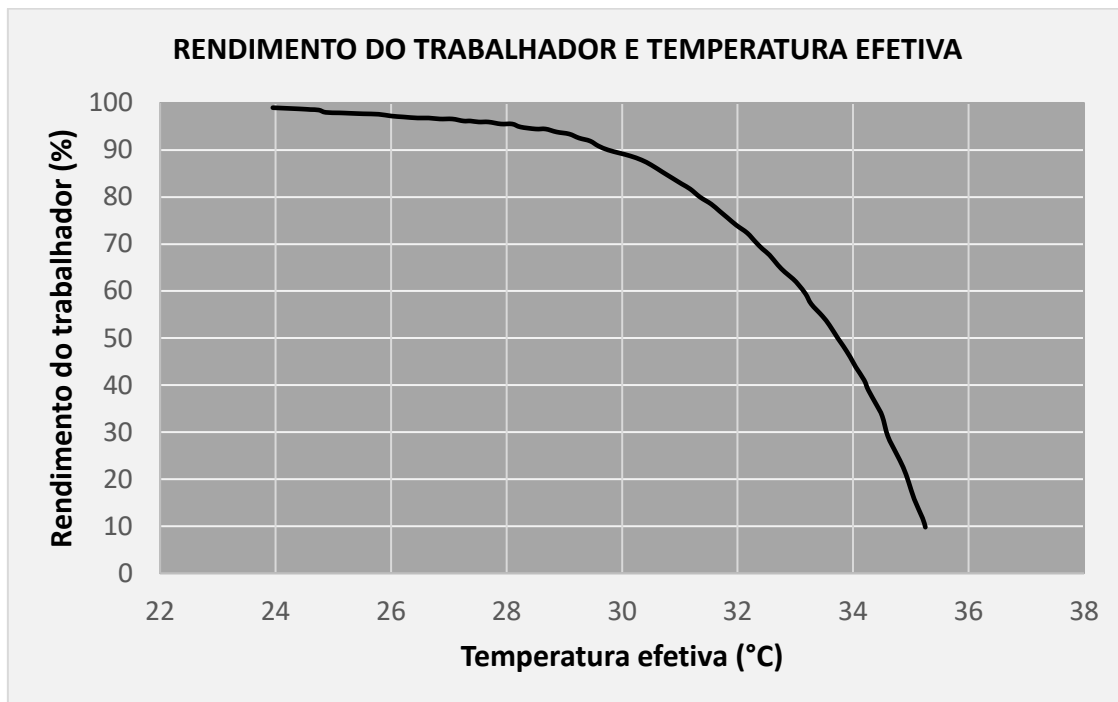
¹ *Run of mine*: minério lavrado

Os principais critérios que indicam como o corpo lida com o estresse térmico são: frequência cardíaca, taxa de suor e temperatura central do corpo. Dentre eles, a taxa de suor é o critério mais utilizado para analisar a tensão térmica, pois é facilmente observável e responde rapidamente a variações leves de calor. Entretanto, um fator importante na avaliação de estresse térmico é a tolerância diferenciada entre trabalhadores adultos do sexo masculino e feminino, nesse caso, porque a temperatura corporal das mulheres pode aumentar de 1 a 2 °C a mais do que a dos homens antes de começar a suar.

Como resultado de temperaturas e umidades excessivamente elevadas em ambientes laborais tem-se efeitos indesejáveis como a diminuição produtiva do trabalhador, maior índice de acidentes devido à queda de atenção, além de efeitos gerais de segurança operacional e financeira.

Polton (1970) demonstrou a relação do rendimento do trabalhador em função da temperatura laboral, conforme ilustrado na Figura 1. Além do rendimento do trabalhador ser consideravelmente afetado em temperaturas muito elevadas como demonstrado graficamente, Figura 1, Eston (2005) indica que os índices de acidentes tendem a aumentar quando as temperaturas no ambiente de trabalho são superiores a 27 °C.

Figura 1- Rendimento do trabalhador em função da temperatura laboral



Fonte: Adaptado de Pouton, 1970.

3.4 Gradiente geotérmico

O gradiente geotérmico é a principal razão pela qual a temperatura aumenta à medida em que se aumenta a profundidade em uma mina. Esse aumento é de aproximadamente 1 Grau Celsius (°C) no intervalo de variação de 70 a 110 metros para os casos de minas de minérios metálicos e 1 °C a cada faixa de 20 a 50 metros para minas de carvão. O calor presente geralmente é o calor residual da acretação planetária de eras passadas na terra e do decaimento de isótopos radioativos, ambos fazem com que o núcleo terrestre esteja a uma temperatura por volta de 5.700 °C, o que acarreta um fluxo médio de calor de 0,07 W/m², em direção a superfície topográfica (SIERRA, 2020).

3.5 Legislação brasileira aplicável em sistemas de ventilação

3.5.1 Conceituação geral

A exploração dos minerais fez com que a Assembleia Constituinte de 1986 reconhecesse a necessidade de sua regulamentação pelo Estado, devido aos potenciais efeitos sobre a vida

das pessoas e sobre o meio ambiente, e pelo estímulo econômico que proporciona devido à sua importância estratégica, mas limitada disponibilidade, (MARTINS, 2017).

Martins (2017) enfatiza que, estando os bens minerais sob o estrito controle do Estado, isso atua como uma forma de prevenir consequências negativas para a atual sociedade brasileira e para as futuras gerações que virão.

O Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), atual Agência Nacional de Mineral (ANM), foi criado em 1934 pelo Decreto número 23.979, de 08 de março de 1934. Em janeiro de 2001, o Diretor Geral do DNPM, criou as Normas Reguladoras de Mineração por meio da Portaria número 237/2001, posteriormente através da portaria 12/2022 e, em janeiro de 2015, da portaria número 36/2015 (MARTINS, 2017).

Segundo a Norma Reguladora de Mineração 01, em seu subitem 1.1, as Normas Reguladoras de Mineração (NRMs) têm por objetivo disciplinar o aproveitamento racional das jazidas, considerando-se as condições técnicas e tecnológicas de operação, de segurança e de proteção ao meio ambiente, de forma a tornar o planejamento e o desenvolvimento da atividade minerária compatíveis com a busca permanente da produtividade, da preservação ambiental, da segurança e saúde dos trabalhadores.

Segundo Costa (2019), a Norma Regulamentadora (NR) no Brasil que trata, entre outros temas, da ventilação em atividades subterrâneas, é a NR 22. Originalmente, ela foi editada pela portaria do Ministério do Trabalho (MTb) número 3.214, de 08 de junho de 1978.

Conforme a redação dada pela portaria número 2.037, de 15 de dezembro de 1999 do Ministério do Trabalho e Emprego (MTE) e composta pela alteração dada pela portaria número 4.219, de 20 de dezembro de 2022 do Ministério do Trabalho e Previdência (MTP), a NR 22 tem por objetivo disciplinar os preceitos a serem observados na organização e no ambiente de trabalho, de forma a tornar compatível o planejamento e o desenvolvimento da atividade mineira com a busca permanente pela segurança e saúde dos trabalhadores.

3.5.2 Normas regulamentadoras

3.5.2.1 Norma Regulamentadora 22

Segundo Gancev (2006), a NR 22 é a norma brasileira que regulamenta os critérios a serem cumpridos por projetos de sistemas de ventilação em minas subterrâneas.

A legislação da NR 22 discorre sobre diversos temas, dentre eles, a ventilação em atividades subterrâneas. Além disso, apresenta conteúdos complementares que devem ser considerados em quaisquer projetos de sistemas de ventilação, direta ou indiretamente, tais como: aberturas subterrâneas, proteção contra poeira mineral, operação com explosivos, entre outros.

A NR 22 apresenta que as atividades em subsolo devem dispor de sistema de ventilação mecânica que atenda aos 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; e
- Ser mantido e operado de forma regular e contínua.

Entre as premissas apresentadas na NR 22, a norma orienta que para cada mina deve ser elaborado e implantado um projeto de ventilação com fluxograma atualizado periodicamente.

Esse projeto deve conter, no mínimo, os seguintes dados:

- Localização, vazão e pressão dos ventiladores principais;
- Direção e sentido do fluxo de ar; e
- Localização e função de todas as portas, barricadas, cortinas, diques, tapumes e outros dispositivos de controle do fluxo de ventilação.

Ainda sobre as responsabilidades a serem observadas pela norma, existem parâmetros mínimos e máximos a serem seguidos, a saber:

- Nos locais onde pessoas estiverem transitando ou trabalhando, a concentração de oxigênio no ar não deve ser inferior a 19 % em volume;
- A velocidade do ar no subsolo não deve ser inferior a 0,2 metros por segundo nem superior à média de 8 metros por segundo onde haja circulação de pessoas;
- A vazão de ar fresco em galerias de minas de carvão, constituídas pelos últimos travessões arrombados, deve ser de no mínimo 250 metros cúbicos por minuto.
- Em outras minas, a quantidade de ar fresco nas frentes de trabalho deve ser de, no mínimo, 2 metros cúbicos por minuto, por pessoa.

É importante citar que em casos especiais, a ANM poderá aprovar o aumento do limite superior da velocidade do ar no subsolo de 8 para até 10 metros por segundo, ouvida a Instância Regional do MTE, conforme a mesma norma.

3.5.2.2 Norma Regulamentadora 15

Sierra (2020) define que os limites de exposição ocupacional são os valores máximos permitidos para exposição a certas substâncias perigosas no ambiente de trabalho, e estes valores devem ser medidos diretamente no local de trabalho.

No Brasil, a NR 15 estabelece limites de tolerância para exposição ocupacional com o objetivo de garantir a segurança, saúde e bem-estar dos colaboradores em ambientes de trabalho insalubres. O Anexo 11 da NR 15 estabelece o limite de tolerância de exposição do trabalhador por agente químico, fixado para jornadas de trabalho até 48 horas. Ressalta-se que em caso de jornadas de trabalhos semanal superior a 48 horas, a Consolidação das Leis Trabalhistas (CLT) prevê outras disposições.

Tabela 2 - Limites de tolerância para concentração de gases em mina subterrânea

Agentes Químicos	ppm (até 48 horas/semana)
CO (monóxido de carbono)	39
CO ₂ (dióxido de carbono)	3.900
NO (óxido nítrico)	20
H ₂ S (sulfeto de hidrogênio)	8
SO ₂ (dióxido de enxofre)	4
NH ₃ (amônia)	20

Fonte: NR 15 - (Brasil, 2023)

3.5.2.3 Norma Regulamentadora 17

A NR 17 - Ergonomia tem como objetivo estabelecer as diretrizes e os requisitos que permitam a adaptação das condições de trabalho às características psicofisiológicas dos trabalhadores, de modo a proporcionar conforto, segurança, saúde e desempenho eficiente no trabalho.

Conforme mencionado anteriormente sobre as disposições da NR 22 em relação aos objetivos da ventilação subterrânea, regular a temperatura e o calor no ambiente subterrâneo é uma das principais finalidades da ventilação. No Brasil, segundo COSTA (2019), a NR 17 estabelece parâmetros para as condições laborais limites quanto a temperatura efetiva, a velocidade e umidade relativa do ar.

Pela NR 17, na redação dada pela Portaria MTP n° 423, de 07 outubro de 2021, deve-se adotar no ambiente laboral medidas organizacionais que proporcionem controle da temperatura, da velocidade do ar e da umidade com a finalidade de proporcionar conforto térmico nas situações de trabalho, observando-se o parâmetro de faixa de temperatura do ar entre 18 e 25 ° C para ambientes climatizados.

3.5.3 Normas reguladoras de mineração

Conforme estabelecido pela NRM 01 - Normas Gerais, as NRMs são aplicáveis a diversas atividades, incluindo pesquisa mineral, lavra, lavra garimpeira, beneficiamento, distribuição e comercialização de bens minerais, entre outros. O subitem 1.5 desta norma

destaca que as Normas Reguladoras de Mineração servem como base para a elaboração e análise de vários documentos técnicos relacionados à atividade mineradora no Brasil. Dentre esses documentos técnicos abrangidos pelas NRMs, estão:

- Plano de Pesquisa;
- Requerimento de Guia de Utilização;
- Relatório Final de Pesquisa;
- Plano de Aproveitamento Econômico - PAE;
- Plano de Lavra - PL;
- Relatório Anual de Lavra - RAL;
- Plano de Fechamento de Mina - PFM;
- Plano de Controle de Impacto Ambiental - PCIAM.

Entre as 22 Normas Reguladoras de Mineração, a NRM 06 trata diretamente da ventilação subterrânea, a qual discorre sobre os seguintes temas:

- Terminologias e definições aplicadas à ventilação subterrânea;
- Metodologia para cálculo de vazão de ar fresco e definições de parâmetros de qualidade do ar;
- Velocidade do ar;
- Portas, viadutos e tapumes;
- Instalação de sistema de ventilação;
- Ventilação auxiliar; e
- Controle da Ventilação.

Na redação da NRM 06, destaca-se a necessidade da conformidade com a NR 22 e a NR 15, únicas NRs citadas no texto da redação dada pela Portaria nº 36, de 16 de janeiro de 2015, publicada no DOU de 20/01/2015.

A Portaria nº 36, de 16 de janeiro de 2015, em seu Art. 2º, destaca que a introdução de definições na redação da NRM 06 teve o objetivo de padronizar a interpretação de conceitos e as fórmulas usadas no cálculo da vazão de ar mínima em ambientes subterrâneos. Essa abordagem representa um diferencial em relação à NR 22 no que se refere à redação.

Ressalta-se ainda que, por meio da Portaria n° 237 de 18 de outubro de 2001, a ANM aprovou as Normas Reguladoras de Mineração (NRMs). Na redação, são abordadas as considerações que motivaram a aprovação das NRMs, entre elas: a necessidade de otimizar os meios e instrumentos para a elaboração e análise de projetos visando à outorga de títulos minerários, a fiscalização e outras atribuições institucionais da ANM. Nesse sentido, elas também devem ser observadas em todos os projetos do setor mineiro, incluindo aspectos como a elaboração, instalação, funcionamento e manutenção do sistema de ventilação.

3.6 Controle da qualidade do ar em minas subterrâneas

O engenheiro responsável pela ventilação e pelo condicionamento de ar em minas subterrâneas deve direcionar suas preocupações não somente para a quantidade de ar distribuído, mas igualmente para a composição química deste. Nesse sentido, ao projetar e trabalhar com sistemas de ventilação de mina, o controle da qualidade do ar fresco é frequentemente um dos problemas mais importantes na ventilação subterrânea. Além disso, diferente de um ambiente industrial, onde as fontes de impureza estão mapeadas e o sistema de ventilação é projetado para isolar a fonte do contaminante, o ambiente mineiro subterrâneo contém potencial para a liberação de contaminantes do ar, tais como: gás de estratos, poeira, gases derivados de detonações e exaustão de diesel, tornando o controle de qualidade deste mais complexo (HARTMAN *et al.* 1997).

Os tipos mais comuns de contaminantes do ar encontrados em ambientes subterrâneos são gases e poeiras. Essas duas classes de contaminantes representam os principais problemas em controle de qualidade.

A American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) recomenda os valores limites de exposição a concentrações de gases atmosféricos em que se acredita que os trabalhadores possam ser expostos diariamente sem efeitos adversos à saúde. Entretanto, alguns colaboradores podem experimentar desconforto com algumas substâncias em concentrações iguais ou inferiores ao limite de referência estabelecido.

3.7 Limites de exposição ocupacional e efeitos na saúde

Os limites de exposição ocupacional podem ser definidos como os limites recomendados para o ambiente laboral. Os valores observados no ambiente de trabalho são comparados com esses limites a fim de avaliar se as condições no local de trabalho implicam algum perigo para a saúde humana.

Os efeitos da exposição a certos tipos de gases na saúde humana podem ser demonstrados conforme apresentado na, de acordo com (SIERRA, 2020).

Tabela 3 - Efeitos na saúde humana decorrentes da exposição a gases

Gás	Efeito Geral	Concentração	Efeito naquela concentração
CO	O CO tem maior afinidade pela hemoglobina do que o O ₂	0.005%	Limite máximo diário de 8 h
		0.02%	Dor de cabeça leve dentro de 2–3 h
		0.04%	Morte dentro de 3 h
		0.16%	Morte dentro de 1 h
CO ₂	Deslocamento de O ₂	0.5%	Respiração mais profunda e rápida
		3%	Suores, pulso rápido
		5%	O corpo pode tolerar apenas alguns minutos de exposição a este nível. Ritmo respiratório torna-se três vezes mais alto que o normal
		7%	Morte
CH ₄	Deslocamento de O ₂		Pode causar sufocamento
SO ₂	Formação de ácido sulfúrico, efeito semelhante ao do NO ₂	10 ppm	SO ₂ ataca a membrana mucosa
		500 ppm	Nível ameaçador à vida
N ₂	Deslocamento de O ₂		N ₂ pode causar sufocamento se deslocar o oxigênio
NO	Irritação das superfícies úmidas do sistema respiratório porque o óxido nítrico e o ácido nítrico se formam quando o NO entra em contato com água	25	Irritação leve dos olhos e do trato respiratório
		0–50	Odor fraco
		60–150	Irritação intensa acompanhada de tosse
		>200 ppm	O NO pode ser fatal a este nível, mesmo se a exposição durar apenas um curto período de tempo. É extremamente tóxico. Os efeitos podem permanecer ocultos por até 72 horas
NO ₂	Formação de ácido nítrico nos pulmões e no plasma sanguíneo, o que pode causar morte	5–10 ppm	Irritação nos olhos
		20 ppm	Irritação nos olhos
		100 ppm	Tosse. Perigo dentro de meia hora
		150 ppm	Perigoso mesmo para curtos períodos de exposição
		250 ppm	Fatal mesmo para curtos períodos de exposição
NH ₃	Formação de ácido nítrico nas superfícies úmidas do sistema respiratório	24–50 ppm	Irritação do nariz e garganta em 10 min
		72–134 ppm	Irritação do nariz e garganta dentro de 5 min
		700 ppm	Irritação severa e imediata do sistema respiratório
		5000 ppm	Espasmos respiratórios. Asfixia rápida
		>10,000 ppm	Edema pulmonar. Fatal. Acúmulo de líquido nos pulmões. Morte
H ₂ S	Paralisia do sistema respiratório	0–10 ppm	Irritação dos olhos, nariz e garganta; dores de cabeça; sensação de leveza; abortos espontâneos
		10–50 ppm	Irritação dos olhos e do trato respiratório. Náusea e vômito, tosse, falta de ar
		50–200 ppm	Conjuntivite, convulsões, coma, morte
H ₂	Deslocamento de O ₂		Pode causar sufocamento

Fonte: Adaptado de SIERRA, 2020

Quanto aos principais gases a serem considerados no contexto da ventilação de minas subterrâneas, pode-se destacar os seguintes, Tabela 4:

Tabela 4 - Principais gases a serem considerados no contexto da ventilação subterrânea

Gás	Cheiro	Sabor	Cor
CO	Inodoro	Sem sabor	Incolor
CO ₂	Inodoro	Ácido, se a concentração for muito alta	Incolor
CH ₄	Inodoro	Sem sabor	Incolor
SO ₂	Enxofre, cheiro forte	Ácido, amargo	Incolor
N ₂	Inodoro	Sem sabor	Incolor
NH ₃	Cheiro forte	Sabor podre	Incolor
NO	Sem odor cheiro adocicado	Sem sabor	Incolor, embora em altas concentrações tende a ser laranja
NO ₂	Cheiro forte, semelhante ao cloro	Sem sabor. Causa uma sensação de queimação no nariz	Laranja
H ₂ S	Ovos podres	Doce	Incolor
H ₂	Inodoro	Sem sabor	Incolor

Fonte: Adaptado de SIERRA, 2020

Geralmente, gases que foram submetidos a processos de difusão ou mistura não se estratificam pela densidade. Sabe-se que isso acontece porque as moléculas se movem, predominantemente, por meio de movimentos térmicos aleatórios, uma vez que esses movimentos exercem forças mais significativas que a ação da gravidade. Comparativamente, os componentes do ar fresco apresentam comportamento similar, pois também não se separam, apesar de suas diferentes densidades.

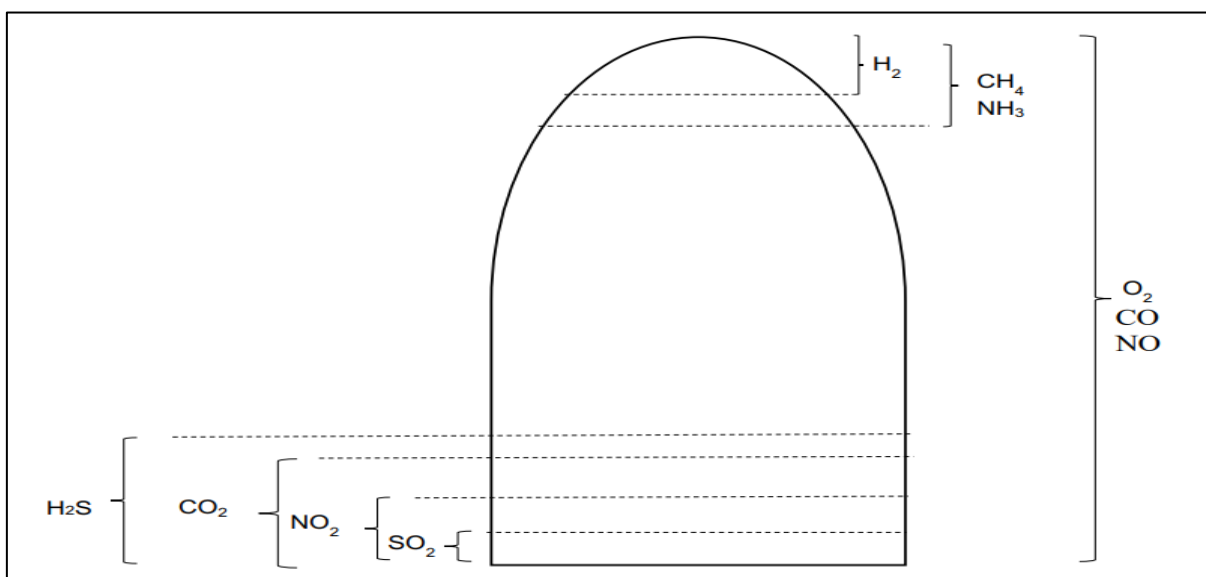
A estratificação de gases ocorre quando não há tempo suficiente para que ocorra a interdifusão. Conforme a Lei de Graham, a taxa de difusão de um gás é inversamente proporcional à raiz quadrada de sua densidade. Assim, gases menos densos tenderão menos a extratificação. Esses gases têm uma taxa de difusão mais elevada, conforme é possível observar na Tabela 5.

Tabela 5 - Densidade relativa de diferentes gases em relação ao ar

Gás	Peso Molecular (g/mol)	Densidade Específica (densidade relativa)
H ₂	2	2/29 = 0,07
CH ₄	16	16/29 = 0,55
NH ₃	17	17/29 = 0,59
CO	28	28/29 = 0,97
Ar	29	1
NO	30	30/29 = 1,03
H ₂ S	35	35/29 = 1,21
CO ₂	44	44/29 = 1,53
NO ₂	46	46/29 = 1,59
SO ₂	64	64/29 = 2,26

Fonte: Adaptado de SIERRA, 2020

Assim, os gases têm uma tendência a aparecerem em galerias e poços (*shafts*) de minas de forma análoga ao apresentado na Figura 2. Que mostra que o gás mais leve ocupará a parte superior da galeria. O que só não ocorrerá se a parte superior já estiver ocupada por outro gás, nessa situação, ocorrerá a estratificação de cima para baixo, conforme a densidade aumenta.

Figura 2 - Estratificação teórica de gases em uma galeria de mineração

Fonte: SIERRA, (2020)

3.8 Monitoramento do sistema atmosférico subterrâneo

Qualquer sistema de ventilação deve possuir um circuito de controle capaz de manipular variáveis como: volume, pressão e vazão de ar. Esse circuito é responsável por medir e direcionar a saída do ventilador. Os primeiros ventiladores possuíam componentes mecânicos relativamente simples para realizar a tarefa de controle. Atualmente, com o avanço da tecnologia de microprocessadores, há uma maior precisão e flexibilidade no ajuste dessas variáveis, o que oferece também um leque mais amplo de opções de modos de controle (MORAES *et al.*, 2016).

É importante buscar garantir que a mina seja segura para os trabalhos. Com esse intuito, pode ser utilizado um Sistema de Monitoramento Atmosférico (SMA), que consiste em sensores instalados dentro da mina, que enviam dados para um dispositivo externo. Assim, caso necessário, o SMA aciona os sistemas de alarme da mina, além de interagir com o sistema de ventilação.

Inicialmente, o SMA era utilizado em minas subterrâneas de carvão para o monitoramento geral do gás metano (CH_4), porém, seu uso foi ampliado para praticamente todos os tipos de mineração subterrânea, possibilitando o controle de possíveis incêndios em instalações elétricas (SIERRA, 2020).

Um exemplo típico desse tipo de monitoramento é o uso de módulos automáticos inteligentes, que são instalados nas áreas de trabalho subterrâneas para monitorar os níveis de monóxido de carbono e dióxido de nitrogênio. A Figura 3 mostra um equipamento produzido pela Epiroc, destinado a esse monitoramento. Esses dispositivos, além de monitorarem a qualidade do ar, possuem recursos que permitem a otimização automática da velocidade do ventilador para atender às demandas de qualidade do ar estabelecidas no projeto e promover economia de energia.

Figura 3 - Módulo inteligente de monitoramento



Fonte: Epiroc, (2023)

3.9 Determinação do fator de atrito

Conforme discutido por McPherson (2009), a rugosidade da superfície de uma abertura subterrânea exerce influência importante na resistência à passagem do ar em uma determinada galeria ou via de acesso de ar e, conseqüentemente, afeta o custo de qualquer sistema de ventilação. Diz-se que o fator de atrito, k , de cada superfície, pode variar em amplas faixas de módulo, dependendo do tamanho e das asperezas de cada superfície.

O objetivo principal do conhecimento do fator de atrito é facilitar a previsão das resistências de passagens de ar planejadas, mas ainda não desenvolvidas.

Existem três principais métodos de determinação de um valor apropriado para o fator de atrito, a saber:

- Por analogia com passagens de ar semelhantes àsquelas do projeto ou do próprio projeto, visando a expansão do sistema de ventilação;
- De tabelas de projeto, como em dados empíricos obtidos através da compilação de vários projetos;
- De dados geométricos.

3.9.1 Determinação do fator de atrito analogia

Durante levantamentos e estudos de sistemas de ventilação, são realizadas medições de quedas de pressão friccional, representadas por p , e dos fluxos de ar correspondentes, Q , em

uma série de passagens de ar, selecionadas pela equipe técnica do projeto. Em estudos de grande escala, é comum selecionar algumas passagens de ar representativas de um projeto de sistema de ventilação para a realização de testes adicionais, nos quais tanto a geometria da passagem de ar quanto a densidade do ar são medidas.

Os valores do fator de atrito, k , podem ser calculados pelo método de analogia, conforme a seguinte equação:

$$k = \frac{p}{Q^2} \times \frac{A^3}{L} \times \frac{1,2}{\rho} \quad (1)$$

Onde:

- k : Fator de atrito (kg/m³);
- Q : Taxa de fluxo de ar;
- p : Queda de pressão friccional;
- A : Área da seção transversal da passagem de ar;
- L : ² Perímetro molhado da seção de passagem de ar;
- ρ : Densidade do ar.

3.9.2 Determinação do fator de atrito por método empírico

Esse método consiste em adotar resultados médios de dados observados em uma ampla variedade de minas, estudadas sob diversas condições e em diferentes países. É importante ressaltar que tais dados devem ser empregados apenas como uma referência aproximada, servindo como guia para a determinação do fator de atrito, até que informações locais mais precisas e específicas estejam disponíveis.

3.9.3 Determinação do fator de atrito por meio de dados geométricos

Outra maneira de determinar o fator de atrito, envolve a análise da relação entre a altura das asperidades da superfície interna de uma passagem e o diâmetro médio hidráulico dessa passagem de ar ou duto. A altura das asperidades se refere às saliências e depressões na

² O termo perímetro molhado é utilizado em hidráulica e refere-se ao comprimento da seção transversal de um canal ou tubulação que está em contato direto com o fluido que flui através dele.

superfície, que podem interferir no fluxo do ar, aumentando a fricção e, conseqüentemente, a resistência ao fluxo. O diâmetro médio hidráulico é uma medida que representa a relação entre a área da seção transversal do duto e o perímetro molhado em contato com o ar. Essa metodologia foi desenvolvida por Alkinson, em meados do século XIX.

3.10 Perdas de pressão por choque

As perdas de pressão por choque não se prestam a cálculos precisos devido à grande variedade de ocorrências e à falta de compreensão sobre sua natureza real. Basicamente, para uma fonte de choque dada, a perda de carga varia com o quadrado da velocidade, que é proporcional à energia cinética do fluido. O cálculo das perdas individuais por choque pode ser realizado de várias maneiras.

De acordo com Hartman *et al.* (1997), as perdas por choque ocorridas na ventilação em mina subterrânea assumem geralmente uma faixa de 10 a 30% da perda total de cargas nos sistemas de ventilação, as quais devem ser consideradas nos cálculos teóricos aplicados as vias aéreas principais e a trechos curtos com muitas curvas ou mudanças de área. No entanto, as perdas de choque presentes em sistemas de ventilação são notoriamente difíceis de se calcular com precisão devido a extensa variação em suas ocorrências e a uma compreensão limitada acerca de sua natureza.

Segundo Thakur (2019), pode-se calcular as perdas de pressão por choque no sistema de ventilação de três maneiras, a saber:

- Comprimento equivalente para perdas por choque;
- Cálculo direto de perda por choque;
- Perdas por choque pelo aumento do fator de atrito.

3.11 Equipamentos envolvidos na ventilação de mina subterrânea

3.11.1 Tipos de ventiladores e equipamentos usados na ventilação

Quanto à classificação dos equipamentos de ventilação mecânica, existem duas categorias principais de ventiladores: de fluxo radial (centrífugos) e de fluxo axial (HARTMAN *et al.*, 1997).

Vale destacar que compressores e injetores já foram considerados máquinas importantes para uso na ventilação subterrânea, mas atualmente, são usados principalmente para a produção de ar comprimido e similares.

Normalmente, o ventilador principal é instalado ao ar livre. Esta prática é preferida, exceto quando a área destinada à instalação apresenta difícil acesso, falta de fornecimento de energia elétrica ou restrições ambientais.

3.11.1.1 Ventiladores Centrífugos

Os ventiladores centrífugos são projetados essencialmente com lâminas radiais que facilitam a entrada de ar no centro da base do equipamento e a saída na periferia dos rotores. Nesses ventiladores, a pressão é gerada por duas ações independentes: a força centrífuga, resultante da rotação do ar, e a energia cinética, transmitida ao ar quando ele deixa a ponta das lâminas do impulsor. O termo centrífugo, significando para longe do centro, ilustra o padrão de movimento do ar, que é expelido do ventilador em um ângulo de 90° em relação ao eixo (THAKUR, 2019).

Figura 4 - Ventilador tipo centrífugo



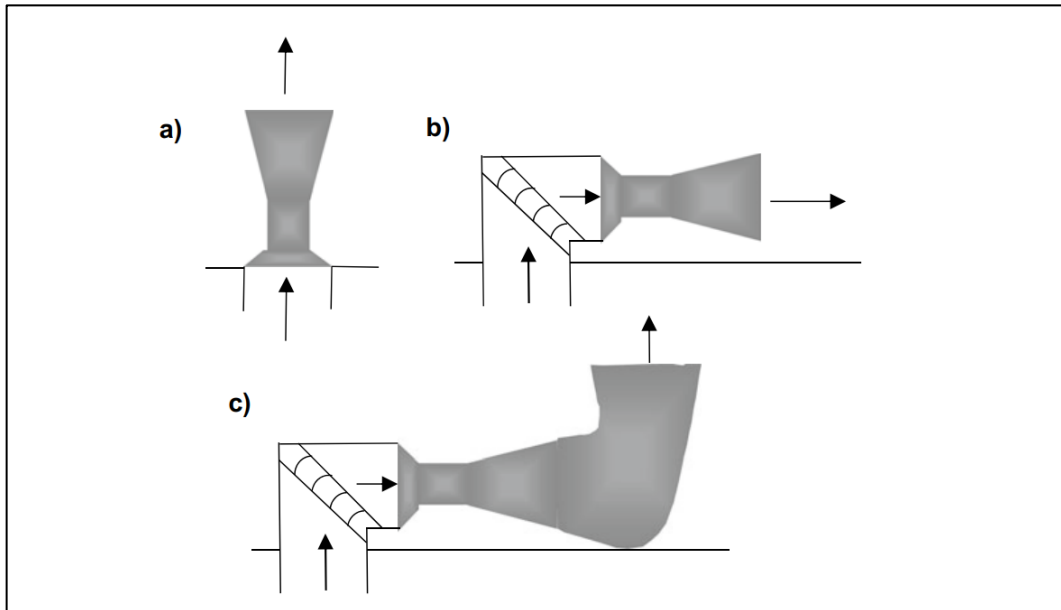
Fonte: Sierra, (2020)

3.11.1.2 Ventiladores axiais

Segundo Sierra (2020), os ventiladores principais do tipo axial podem apresentar-se em configurações diversas, conforme ilustrado na Figura 5: vertical, como no item 'a'; horizontal com saída horizontal, no item 'b'; e horizontal com saída vertical, representado no item 'c'.

Os ventiladores axiais horizontais eram mais comumente empregados na indústria mineral, pois facilitavam os aspectos construtivos. Entretanto, Sierra (2020) aponta que atualmente, para reduzir as perdas por choque e consequente o consumo de energia, tem-se priorizado o uso dos ventiladores axiais com configuração estrutural vertical.

Figura 5 - Demonstra as configurações típicas de instalação para ventiladores axiais



Fonte: Sierra, (2020)

Na Figura 6 é demonstrado um ventilador tipo axial vertical instalado na Mina do Rio Dugald, na Austrália.

Figura 6 - Ventilador axial tipo vertical



Fonte: Zitron, (2015)

3.11.1.3 Comparação entre ventiladores centrífugos e axiais

Comparar ventiladores centrífugos e axiais envolve considerar uma série de fatores, incluindo a aplicação pretendida, as condições operacionais, a eficiência energética desejada, os custos de instalação e manutenção, entre outros.

Em comparação com os ventiladores centrífugos, os axiais apresentam os seguintes pontos positivos:

- São estruturalmente mais compactos, menores e mais leves;
- Geralmente não requerem fundações profundas para instalação;
- Possuem menos falhas quando não se usa sistemas complexos de acionamento do motor;
- Possuem menos inércia, tornando-os mais fáceis de iniciar.

No entanto, ao comparar os ventiladores centrífugos com os axiais, observam-se as seguintes vantagens:

- São mais silenciosos;
- Tendem a ser mais eficientes em termos de consumo de energia;
- São mais resistentes a ambientes mais agressivos;
- São menos propensos a sobrecarga.

Vale destacar que para cada tipo de ventilador existe vantagens e desvantagens associadas, de tal forma que a escolha entre o ventilador centrífugo ou axial dependerá das necessidades específicas da aplicação.

3.11.2 Equipamento de escavação de aberturas verticais e semiverticais

Conforme destacado por Atlas Copco (2007), a Máquina de Perfuração Ascendente (*Raise Boring Machine - RBM*) é um equipamento amplamente utilizado para atender diversas necessidades de escavações em mineração subterrânea. Suas aplicações incluem a criação de aberturas para sistemas de ventilação, produção de minério, acesso de pessoal e transferência de materiais entre diferentes níveis da mina. A

Figura 7 demonstra um exemplar do RBM.

Figura 7 - Raise Boring Machine



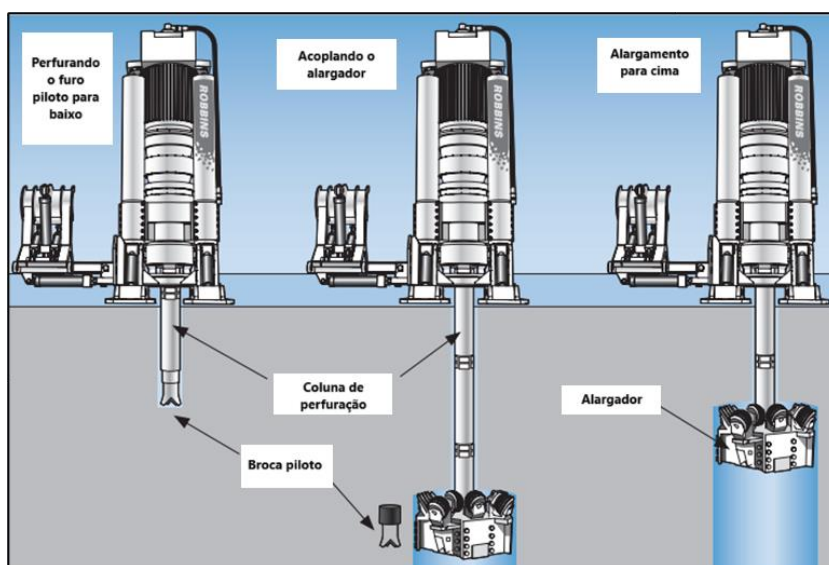
Fonte: Atlas Copco, (2007)

Quando aos equipamentos de *Raise Boring Machine* tipo padrão, eles possuem capacidade de perfurar e escavar em ângulos entre 45 e 90 ° em relação a horizontal. Entretanto, destaca-se que com ajustes esses equipamentos também são capazes de perfurar e escavar efetivamente em ângulos entre 45° e a horizontal.

A aplicação do RBM é normalmente configurada na superfície ou no nível superior entre dois níveis que serão conectados através da escavação. O procedimento operacional inclui basicamente três etapas. Inicialmente, faz-se o deslocamento e posicionamento do equipamento, seguido de uma perfuração piloto com um diâmetro de pequena dimensão de abertura até o nível inferior, por fim, um alargador é acoplado à coluna de perfuração no nível inferior, iniciando-se a perfuração ascendente.

A Figura 8 demonstra o procedimento supracitado, no qual podem ser vistas as três etapas.

Figura 8 - Processo de perfuração RBM

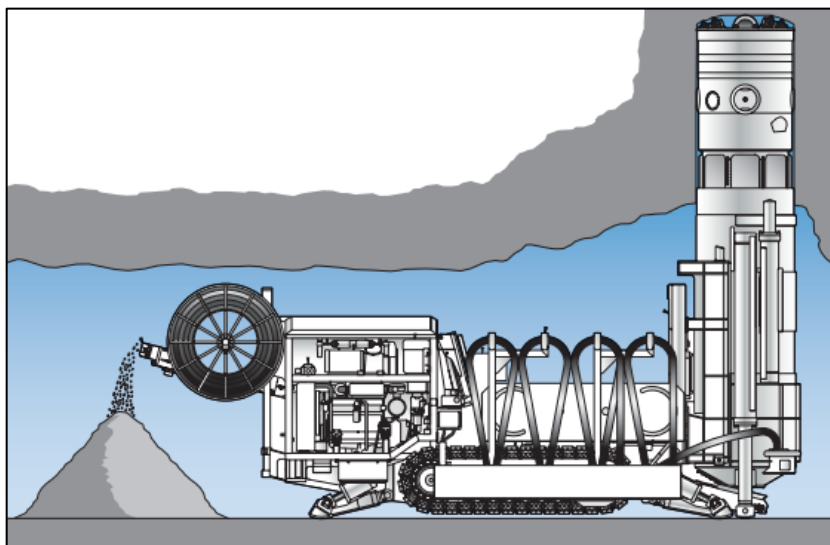


Fonte: Adaptado de Atlas Copco, (2007)

Quando o acesso ao nível superior é limitado ou impedido de alguma forma, a perfuração pode ser feita a partir do posicionamento no nível inferior. Nesses casos, estabilizadores são acionados periodicamente para reduzir oscilações e estresse de flexão na coluna de perfuração ao longo dos trabalhos.

A Figura 9 demonstra o procedimento de perfuração feito com o posicionamento do equipamento no nível inferior.

Figura 9 - Perfuração com o RBM posicionado no nível inferior



Fonte: Atlas Copco, (2007)

3.12 Ventilação de minas

3.12.1 Terminologias essenciais de sistemas de ventilação

Na NRM 06, são tratadas terminologias aplicadas ao sistema de ventilação, incluindo poço e chaminé. Nesse sentido, é importante definir esses termos.

Conforme discutido por CURI (2017), o poço da mina, também conhecido como *shaft*, é uma abertura vertical ou semivertical, por onde se faz o principal acesso à mina. Os *shafts* são equipados com caçambas (*skips*), que transportam minério ou estéril, e gaiolas (*cages*), utilizadas para o transporte de pessoas e materiais. Segundo Atlas Copco (2007), o *skip* é a maneira mais eficiente de içar o minério do subsolo para a superfície.

Vale salientar que na década de 1970, com a maior mecanização dos processos minerários e a consequente evolução das práticas de mineração, os poços (*shafts*) nas minas mais modernas foram gradativamente substituídos por rampas de acesso, denominadas rampas principais. Essas permitem um transporte mais eficiente de minério, estéril e pessoal, o que reduziu a dependência dos *shafts*.

Outra terminologia é a chaminé de ventilação, também conhecida como *raise* ou *winze*. As chaminés de ventilação são aberturas verticais, geralmente entre níveis e que, em geral, não

vão a superfície. Possuem diferentes finalidades, tais como: acesso ao minério, estéril, uso na ventilação, como rota de fuga, entre outras. Conforme apresentado por Atlas Copco (2007), a inclinação das aberturas varia de 55° , que é o ângulo mínimo para transporte por gravidade de rocha desmontada, até vertical, isto é, 90° , com seções transversais que variam de 0,5 a 30 m².

É importante notar que quando a escavação está progredindo para baixo, essas aberturas são chamadas de *winzes*.

3.12.2 Ventilação principal

3.12.2.1 Requisito de Fluxo de Ar na Mina

De acordo Sierra (2020), a quantidade de ar fresco necessária para ventilar toda a mina, deve ser capaz de cumprir os itens a seguir:

- Diluir ou extrair gases tóxicos asfixiantes e inflamáveis;
- Diluir, extrair ou deslocar poeira;
- Reduzir ou aumentar, conforme apropriado, a temperatura e a umidade do ambiente de mineração;
- Reduzir a possibilidade de transmissão de doenças infecciosas;
- Levar ar fresco em quantidade suficiente para onde é necessário.

A taxa de ar fresco necessária para ventilar uma mina subterrânea pode ser estimada inicialmente em função da produção média da mina e do método de lavra. A vazão total de ar fresco pode ser descrita de acordo com a equação (2) que se segue.

$$Q = \alpha t + \beta \quad (2)$$

Onde:

- Q: Taxa de fluxo de ar (m³/s);
- α : Fator de produção $\left(\frac{m^3}{s} \times \left(\frac{Mt}{ano}\right)^{-1}\right)$;
- t: Produção anual média (Mt/ano);
- β : Fluxo de ar preciso para ventilar a infraestrutura de mineração (m³ /s).

A Tabela 6 demonstra os valores do fator de produção α em função do método de lavra.

Tabela 6 - Fator de produção em função do método de operação

Método de Lavra	α - Fator de Produção
Abatimento em Blocos (<i>Block Caving</i>)	50
Câmaras e Pilares (<i>Rooms and Pillars</i>)	75
Abatimento em Subníveis (<i>Sublevel Caving</i>)	120
Realces ou Alargamentos Abertos (<i>Open Stopping</i>)	
• Grande escala: > 5 Mt/ano	160
• Pequena escala: < 5 Mt/ano	240
Corte e Enchimento (<i>Cut and Fill</i>)	
• Mecanizado	320
• Ferramentas manuais	400

Fonte: Adaptado de Sierra, (2020)

No Brasil, é importante reiterar a importância das Normas Reguladoras de Mineração (NRMs) e Normas Regulamentadoras (NRs), em especial a NRM 06 e a NR 22. Estas normas incluem as equações e fórmulas essenciais para calcular a vazão de ar fresco necessária em minas subterrâneas, independentemente de serem minas de carvão ou de outros minerais.

Antes de apresentar as fórmulas para a determinação da vazão de ar fresco da NRM 06 e da NR 22, é válido destacar que para alguns consultores especializados em ventilação subterrânea a NR 22 pode estar incompleta no que se refere ao detalhamento da fórmula para o cálculo da vazão necessária em minas subterrâneas em função da carga de explosivos usada (COSTA, 2019).

Inicialmente, serão apresentadas as informações referentes à NRM 06 da ANM.

Em minas de carvão, a vazão de ar fresco mínima admissível determinada pela NRM 06 segue as seguintes condições dadas pela redação da Portaria nº 36, de 16 de janeiro de 2015, publicada no DOU de 20/01/2015.

- A vazão de ar fresco mínima admissível em galerias de minas de carvão ativas, constituídas pelos últimos travessões arrombados, deve ser de 250 m³/min;

- Em frente de lavra ou de desenvolvimento em atividade sem uso de equipamentos a óleo diesel, a vazão de ar fresco deve se dimensionada à razão de 15 m³/min/m²;
- No caso de painel de lavra em atividade, sem uso de equipamentos a óleo diesel, a vazão de ar fresco deve se dimensionada à razão de 15 m³/min/m² da área de cada frente na qual estiver ocorrendo operações unitárias da lavra;
- Em frente de serviço sem uso de equipamentos a óleo diesel, a vazão de ar fresco, mínima admissível, deve ser de 85 m³/min e o sistema de ventilação auxiliar instalado em posição que evite a recirculação de ar;
- Em frente de trabalho isolada ou em um mesmo painel de lavra em atividade, com uso de um equipamento a óleo diesel, a vazão de ar fresco calculada para cada tipo de frente de trabalho isolada ou painel de lavra deve ser aumentada em 3,5 m³/min para cada cavalo-vapor de potência instalada do equipamento;
- No caso de uso simultâneo de mais de um equipamento a diesel, na frente de trabalho isolada ou painel de lavra, deve ser adotada a seguinte fórmula para o cálculo do aumento na vazão de ar fresco, utilizando o valor que trata o item anterior.

$$Q_t = 3,5(P_1 + 0,75P_2 + 0,5P_n) \quad (3)$$

Onde:

- Q_t : Vazão total de ar fresco (m³/min);
- P_1 : Potência em cavalo-vapor do equipamento de maior potência em operação (cv);
- P_2 : Potência em cavalo-vapor do equipamento de segunda maior potência em operação;
- P_n : Somatório da potência em cavalo-vapor dos demais equipamentos em operação.

Nos demais casos referidos pela NRM 06 como - outras minas, a vazão necessária de ar fresco deve ser calculada de três formas distintas. A vazão final, ou seja, a que deve ser utilizada no projeto do sistema de ventilação, é o maior valor encontrado entre as três formas de cálculo.

Considerando o que foi disposto, é importante destacar que a NRM 06 define frente de trabalho como cada local onde ocorrem quaisquer operações dentro da mina, seja ela frente de

lavra, de serviço ou desenvolvimento, com presença permanente ou intermitente de trabalhadores. A seguir são apresentadas as três formas de cálculo determinadas pela NRM 06.

Cálculo da vazão de ar fresco em função do número máximo de pessoas ou máquinas a combustão a óleo diesel:

$$Q_t = Q_1 \times n_1 + Q_2 \quad (4)$$

Onde:

- Q_t : Vazão total de ar fresco em (m³/min);
- Q_1 : Quantidade de ar por pessoa em m³/min (2,0 m³/min/pessoa);
- n_1 : Número de pessoas no turno de trabalho;
- Q_2 :³ Em caso de uso de apenas um equipamento por frente de trabalho isolada, a vazão de ar fresco, Q_2 , é equivalente ao produto de 3,5 (m³) para cada cavalo-vapor de potência dos equipamentos. Quando mais de um equipamento é utilizado em frentes de trabalho isoladas, a equação (3) é aplicada.

Cálculo da vazão de ar fresco em função do número de explosivos:

$$Q_t = 0,5A \times \frac{V}{t} \quad (5)$$

Onde:

- Q_t : Vazão total de ar fresco em (m³/min);
- A : Quantidade total em kg de explosivos empregados por fogo;
- t : Tempo de aeração (reentrada) da frente de trabalho em atividade, em minutos (min);
- V : Volume gasoso gerado por quilo de explosivo em m³/kg.

Cálculo da vazão de ar fresco em função da tonelagem mensal desmontada:

$$Q_t = q \times T \quad (6)$$

Onde:

- Q_t : Vazão total de ar fresco em (m³/min);

³ Q_2 portanto, é obtido por meio de parte das mesmas premissas assumidas para minas de carvão expostas na redação da NRM 06.

- q : Vazão de ar em m³/min para 1000 toneladas desmontadas por mês, assumindo um mínimo de 180 m³/min para cada 1.000 t desmontada no mês;
- T : Produção em toneladas desmontada por mês.

Quanto a metodologia abordada pela NR 22 para a determinação da vazão necessária de ar fresco, apresentada no Anexo I da norma, vale destacar que quando comparada com a NRM 06, a NR 22 apresenta diferenças, a saber:

A NR 22 estabelece que em minas de carvão a quantidade de ar por pessoa deve ser de 6,0 m³/min. A NRM 06 abandonou essa metodologia para minas de carvão, conforme já apresentado neste TCC. Quanto às demais minas, os valores de vazão de quantidade mínima de ar por pessoa, conforme estabelecidos pela ANM 06 e NR 22, são iguais e, conforme já exposto, equivalem a 2,0 m³/min/pessoa.

Outro aspecto em que a NR 22 e NRM 06 divergem é na maneira de calcular a vazão de ar fresco em função do consumo de explosivo. A NR 22 considera apenas a variável correspondente à quantidade total, em quilogramas, de explosivos utilizados por desmonte, além do tempo de aeração. Já a NRM 06, como previamente mencionado, leva em conta, além da quantidade total de explosivos utilizados por desmonte e o tempo de aeração, o volume gasoso gerado pela detonação.

Em suma, como apresentado no Anexo I da NR 22, tem-se a seguinte equação para a determinação da vazão de ar fresco em função do consumo de explosivos:

$$Q_t = 0,5 \times A \times t^{-1} \quad (7)$$

Onde:

- Q_t : Vazão total de ar fresco em (m³/min);
- A : Quantidade total, em quilogramas, de explosivos empregados por desmonte;
- t : Tempo de aeração, isto é, reentrada na frente de trabalho, em minutos.

Além dessas diferenças, a NRM 06 e a NR 22 se diferem na forma de determinar a vazão de ar fresco em função consideração da potência das máquinas com motores a combustão a óleo diesel. Nesse caso, a NR 22 considera a potência total da soma de todos os equipamentos em cavalo-vapor e não as considerações ponderadas pela NRM 06 discutidas na equação (3).

Pela NR 22 a potência total é considerada como na equação (8) a seguir. A seguinte equação demonstra o procedimento para o cálculo da vazão de ar fresco em função do número máximo de pessoas ou máquinas com motores a combustão a óleo diesel.

$$Q_t = Q_1 \times n_1 + Q_2 \times n_2 \quad (8)$$

Onde:

Q_t : Vazão total de ar fresco em m³/min;

Q_1 : Quantidade de ar fresco por pessoa em m³/min;

n_1 : Número de pessoas no turno de trabalho;

Q_2 : 3,5 m³/min/cv (cavalo-vapor) dos motores a óleo diesel;

n_2 : número total de cavalo-vapor dos motores a óleo diesel em operação.

É possível observar na equação (8) que a potência dos equipamentos é considerada sem ponderação, isto é, a vazão de ar fresco em função da potência dos equipamentos não considera separadamente os equipamentos quanto a sua potência individual, mas sim a potência total combinada.

Vale ressaltar que a ponderação matemática apresentada atualmente na NRM 06, especificada na equação (3), quanto a consideração da potência dos equipamentos, passou a ser válida a partir da redação dada pela Portaria n° 36, de 16 de janeiro de 2015, publicada no DOU de 20/01/2015. Nesse contexto, até a alteração realizada por essa portaria, a NRM 06 mantinha o cálculo da vazão de ar fresco, considerando o número máximo de pessoas ou máquinas com motores a diesel, alinhado com o que era estipulado pela NR 22.

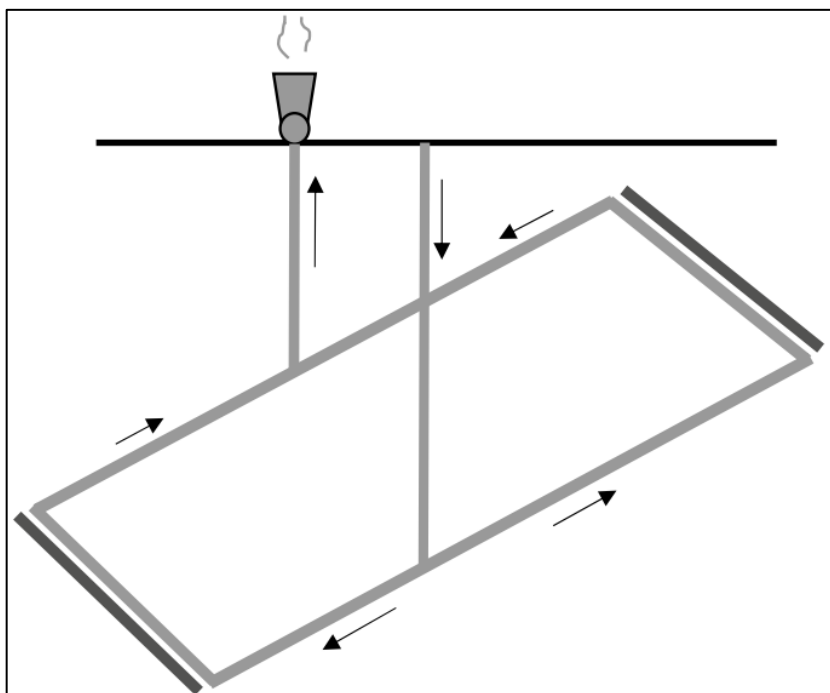
3.12.2.2 Ventilação Forçada

Segundo Sierra (2020), ao utilizar ventiladores mecânicos para fornecer ar fresco a uma galeria de ventilação ou região específica de uma mina, estamos lidando com um sistema de ventilação forçada. A localização da entrada e saída das estruturas de ventilação em relação ao depósito de minério, determina os dois tipos de ventilação forçada: central e lateral.

A Figura 10 demonstra o sistema de ventilação do tipo central, também conhecido como bidimensional. Esse sistema é caracterizado pela entrada de ar fresco a partir do centro da mina, passando pelas galerias de ventilação e indo até os realces de lavra. O ar viciado retorna nas

galerias de ventilação até o *shaft*, localizado no centro da mina. Nesse caso, o *shaft* de abdução de ar fresco e o *shaft* de saída de ar viciado estão localizados no centro da mina, em paralelo.

Figura 10 - Sistema de ventilação forçada tipo central

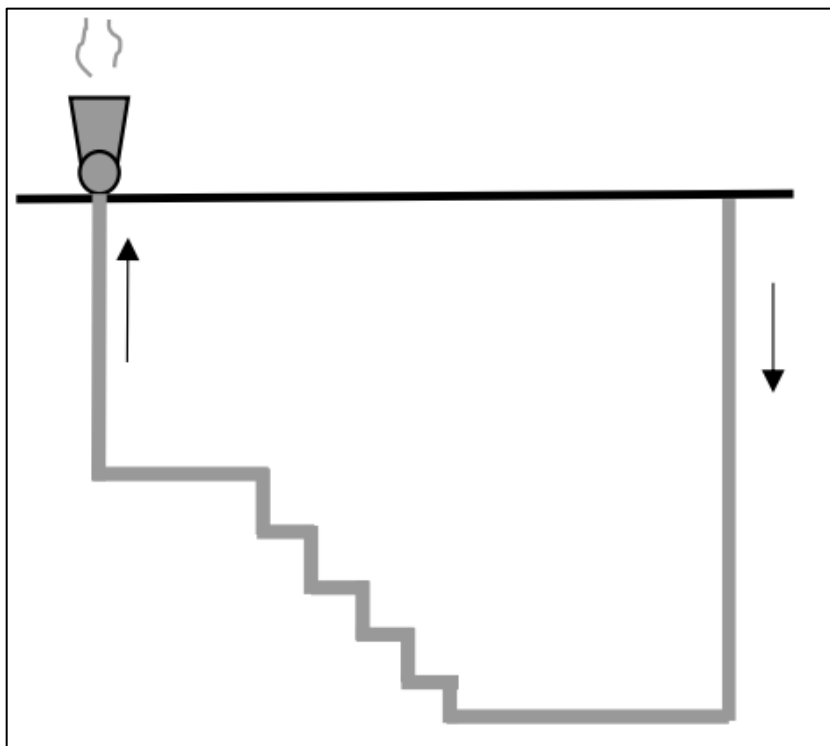


Fonte: Sierra, (2020)

Esse sistema é muito usado em minas de médio porte e apresenta algumas vantagens, como instalações mais agrupadas e conveniência nas etapas iniciais do empreendimento mineiro. Entretanto, apresenta também algumas desvantagens típicas como o aumento da resistência do circuito de ventilação, que se torna mais evidente à medida que a mina se expande. Há também o risco de curtos-circuitos, pois os caminhos do ar fresco e viciado estão muito próximos uns dos outros, e por vezes, quase paralelos. Esses curtos-circuitos geralmente ocorrem perto dos *shafts*, onde a pressão é máxima. Além disso, um acidente em um *shaft*, como um desabamento, pode afetar o outro, já que ambos estão muito próximos entre si.

No caso da ventilação lateral ou de limite, o ar fresco vai do *shaft* de admissão do ar até os realces de lavra e dos realces de lavra até o *shaft* de exaustão de ar, que está localizado nos limites da concessão, sem retornar ao centro da mina. A Figura 11 o esquema geral para esse tipo de ventilação forçada.

Figura 11 - Sistema de ventilação forçada tipo lateral ou de limite



Fonte: Sierra, (2020)

Hartman *et al.* (1997) aponta que o sistema de ventilação forçada mais comumente usados na indústria mineral é a ventilação por depressão. Entre as vantagens da ventilação por depressão estão:

- As galerias de transporte são mantidas livres de poeira e gás, permitindo que os trabalhadores tenham uma atmosfera de trabalho mais limpa;
- Simplifica a ação das equipes de resgate se ocorrerem incêndios ou explosões;
- O sistema pode ser mais eficiente em termos energéticos;
- Em uma mina com grisú (gás metano), esse sistema favorece sua saída para o exterior, já que esse gás tem uma densidade menor que o ar.

Quanto as desvantagens desse sistema, podem-se citar:

- A poeira gerada pelo transporte no *shaft* de entrada de ar fresco pode atingir os realces de lavra;
- O ar sujo e a poeira passam pelo ventilador e podem afetar o seu funcionamento normal;
- O gás metano, que pode escapar das áreas já abandonadas de uma mina subterrânea, pode ser direcionado para o centro da mina, causando problemas subsequentes.

3.12.3 Ventilação secundária

Conforme discutido por Hartman *et al.* (1997), garantir uma circulação de ar eficaz nas frentes de trabalho em minas subterrâneas é uma das funções fundamentais do engenheiro de minas responsável pela ventilação, pois é exatamente nas frentes de trabalho que o ar ventilado é crucial para as operações. A ventilação dessas frentes pode ser uma extensão do sistema de ventilação principal; no entanto, esse sistema principal nem sempre é perfeitamente adequado para ventilar aberturas sem saída.

Entre as funções principais da ventilação auxiliar destacam-se a ventilação de áreas de trabalho fechadas e o fornecimento de um fluxo de ar adicional para apoiar o sistema de ventilação principal. A utilização mais frequente da ventilação auxiliar ocorre em áreas e trechos de desenvolvimento ou lavra que não possuem saída (HARTMAN *et al.*, 1997).

Entre os locais ou estruturas que requerem ventilação auxiliar, estão: rampas, vias horizontais de transporte e acesso (*drifts*), elevações, *shafts*, câmaras de lavra com uma entrada, entre outras.

Conforme apresentado por Herrmann (1972), os tipos de ventilação secundária podem ser de três tipos diferentes, a saber:

- Ventilação por insuflamento;
- Ventilação por exaustão;
- Sistema misto.

3.12.3.1 Ventilação por insuflamento

A ventilação por insuflamento força o ar fresco⁴ em direção à frente da galeria ou frente de trabalho. Entre as características principais desse tipo de sistema de ventilação, estão:

- Redução do tempo para o reinício das atividades após a detonação;
- Retorno dos gases de exaustão através da galeria, o que pode trazer desvantagens;
- Favorece a remoção dos gases na face ativa;

⁴ Ar fresco pela NRM 06: é todo ar de adução proveniente da superfície em condições de uso por máquinas e homens, que não tenha sido utilizado para ventilar frentes de lavra, serviços e desenvolvimento.

- Suspensão e dispersão de poeira devido à turbulência provocada pela corrente de ar.

3.12.3.2 Ventilação por exaustão

Nesse sistema, o ventilador é colocado em uma das extremidades de uma tubulação, extraindo o ar viciado e contaminado, captado das frentes de trabalho. As características principais desse sistema são as seguintes:

- Proporciona uma zona permanentemente limpa entre a entrada da galeria e o início do duto de sucção;
- Não movimenta contaminantes diretamente na galeria, mas os confina no duto de ventilação;
- Não efetua a retirada de gases provenientes das detonações de forma eficiente nas frentes de trabalho.

3.12.3.3 Sistemas misto

O sistema misto consiste em dois ventiladores posicionados na galeria principal, um deles é configurado para insuflar o ar e o outro para a exaustão do ar. O sistema utiliza dutos rígidos ou de lona reforçada com aço.

Nesse sistema, se a taxa de fluxo de ar exaurido for maior do que a de insuflamento, o ar retorna principalmente pelo duto de exaustão. Entretanto, se a taxa de fluxo de ar insuflado for maior que a exaurida, o ar retorna pela galeria.

Mesmo que esse sistema apresente os benefícios dos dois outros sistemas já mencionados, por insuflação e exaustão, ele também tem muito de suas desvantagens, além de possuir uma instalação mais complexa e mais cara.

3.12.4 Curva característica da mina

A curva característica de uma mina pode ser compreendida inicialmente como uma representação gráfica que demonstra a relação entre a quantidade de ar necessária no sistema

de ventilação de uma mina e a pressão requerida para mover esse ar através da rede de ventilação.

Quando as perdas de pressão e por choque são determinadas para o sistema de ventilação de uma mina, juntamente com a definição da vazão de ar fresco necessária, torna-se necessário projetar a curva característica da mina para selecionar o ventilador que atenda às demandas do projeto. A curva característica pode ser entendida como uma relação dos requisitos de pressão para diferentes quantidades de vazão em um sistema de ventilação de uma mina (THAKUR, 2019). A demonstração gráfica da curva é baseada na equação (9) a seguir.

$$H = R \times Q^2 \quad (9)$$

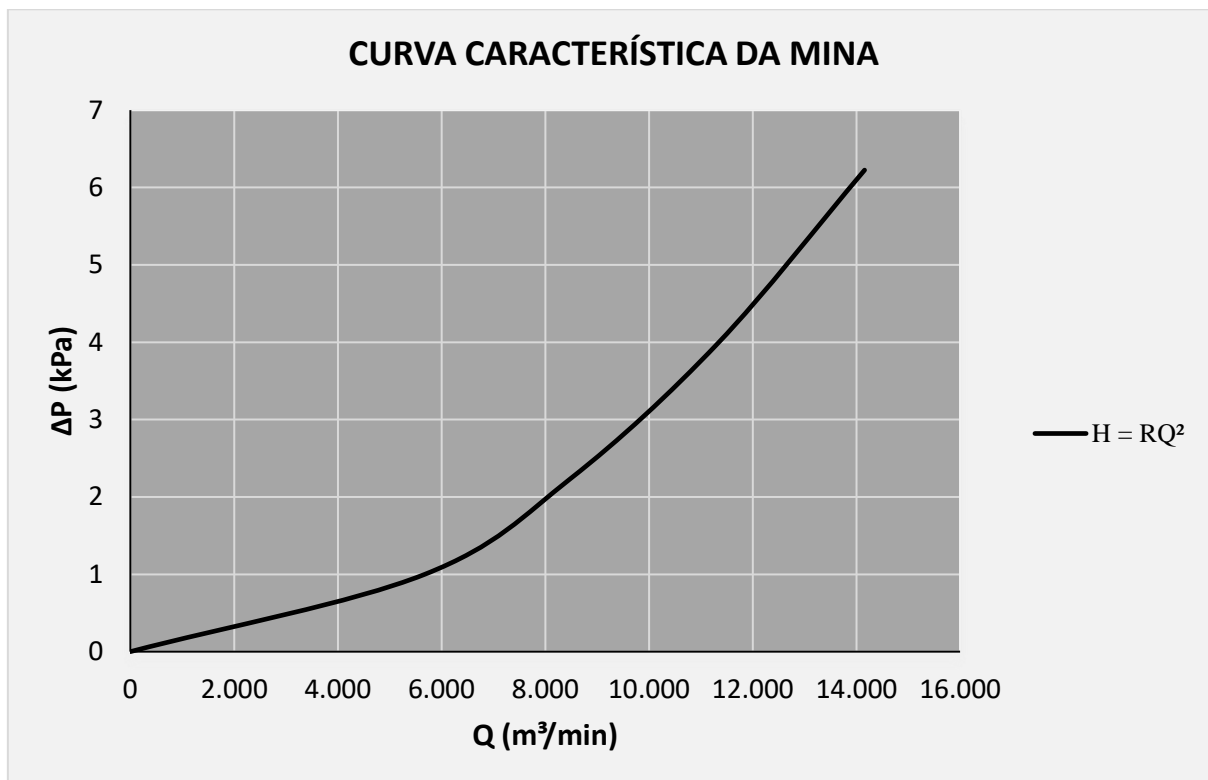
Onde:

- H : Perda de carga em uma via de ar;
- R : Constante de proporcionalidade, referida como a soma total de todas as resistências ao fluxo ao longo de um percurso ou via de ar;
- Q : Vazão necessária para vencer a resistência R e fazer fluir ar fresco ou ar de adução no sistema de ventilação.

A curva característica da mina, é graficamente, equivalente a uma parábola com domínio maior que zero. A curva da parábola fica cada vez mais próxima do eixo das ordenadas, quanto maior for o valor da resistência.

A seguir, é apresentado na Figura 12 demonstra um exemplo adaptado discutido por Thakur (2019), de uma curva característica da mina.

Figura 12 - Curva teórica característica da mina



Fonte: Adaptado de Thakur, (2019)

3.12.5 Curvas características de ventiladores

As curvas características dos ventiladores são a representação gráfica da inter-relação entre vários parâmetros do ventilador, a saber:

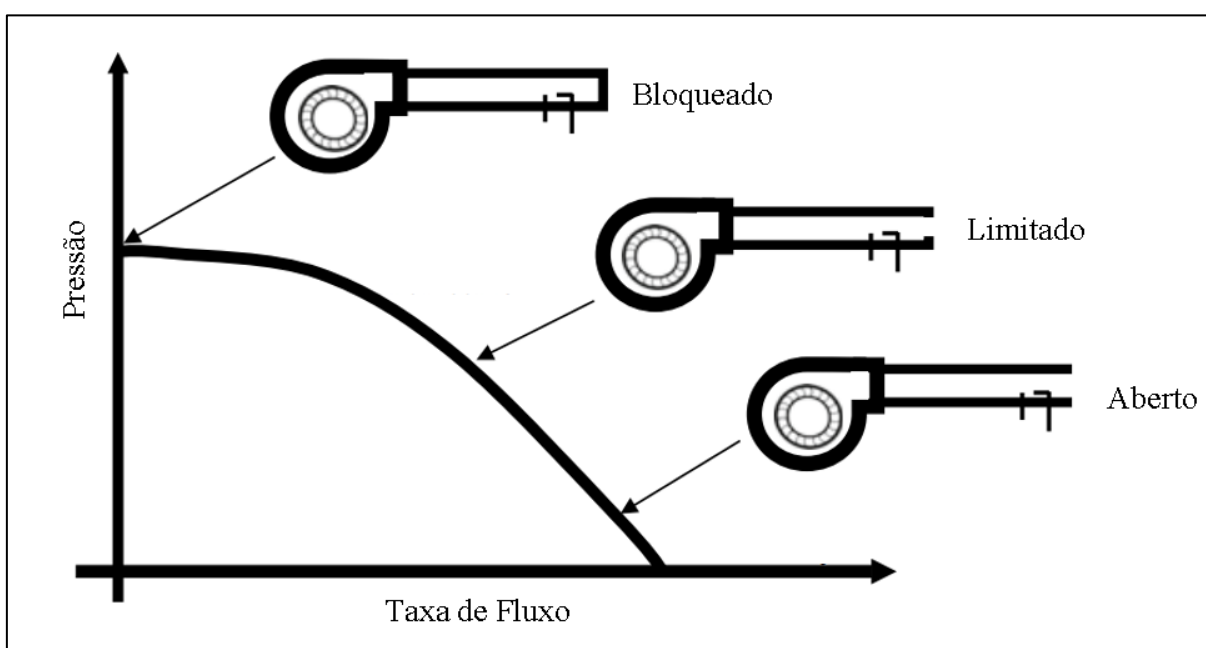
- Taxa de fluxo de ar (vazão);
- Pressão estática ou total;
- Velocidade do ventilador;
- Eficiência e requisitos de potência de um ventilador.

A determinação das curvas características de ventiladores é realizada através de testes que envolvem a variação da pressão de trabalho e a medição da taxa de fluxo de ar. Esses ensaios são conduzidos fechando-se progressivamente a saída do ventilador, o que aumenta a pressão diferencial a ser superada pelo equipamento. Dessa forma, a taxa de fluxo de ar

fornecida é registrada em diferentes condições de resistência. A curva característica do ventilador, portanto, ilustra como a taxa de fluxo de ar se modifica em resposta às variações dessas resistências (SIERRA, 2020).

Na Figura 13 é demonstrada a curva característica de um ventilador à velocidade rotacional constante, obtida por meio de experimento, conforme o modelo de ensaio mencionado anteriormente.

Figura 13 - Procedimento experimental para obtenção da curva característica do ventilador



Fonte: Sierra, (2020)

3.12.6 Combinação das características da mina com o ventilador

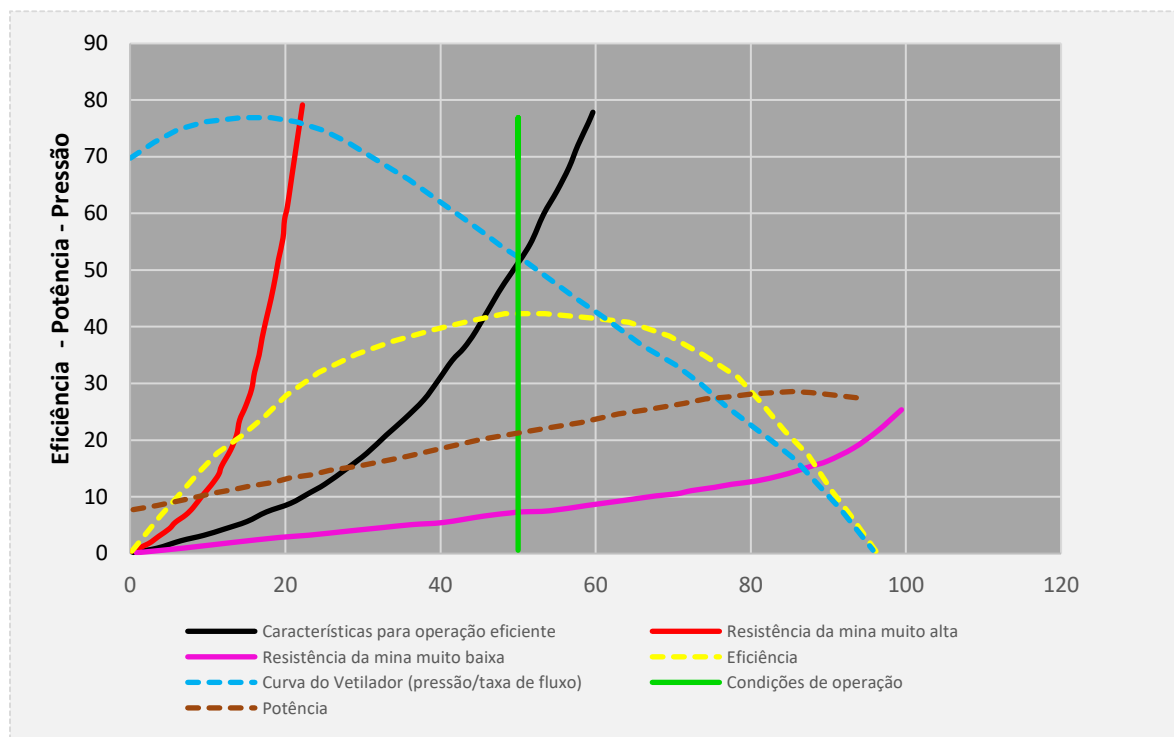
Conforme apresentado por Thakur (2019), para se selecionar um ventilador que atenda as características da mina eficientemente, deve-se plotar nos mesmos eixos a curva característica do ventilador e da mina. O ponto de interseção das duas curvas características indica a pressão e o volume nos quais o ventilador operará na ventilação da mina, levando em consideração as características do empreendimento. Ressalta-se, ainda, que o ventilador deve apresentar alta eficiência no ponto de operação. Deve-se observar também dois aspectos inicialmente na interpretação gráfica, além dos já citados:

- Quando a resistência da mina é muito alta ou muito baixa, a correlação com os resultados da curva do ventilador pode levar a resultados inadequados;

- É muito mais fácil projetar um ventilador que se adapte às características da mina do que o contrário.

A relação das características da mina e do ventilador pode ser visualizada na Figura 14.

Figura 14 - Combinação das características da mina com as características do ventilador



Fonte: Adaptado de Thakur, (2019)

3.12.7 Localização do ventilador e vias de ventilação principais

Em qualquer projeto de sistema de ventilação, é necessário desenvolver ou providenciar pelo menos duas aberturas principais, independentemente do método de lavra subterrâneo utilizado. No contexto da ventilação de minas, essas vias são destinadas à entrada de ar e à via de retorno. A principal preocupação, é com a segurança, no entanto, a economia e a conveniência também desempenham um papel importante na tomada da decisão final para o projeto de ventilação (HARTMAN *et al.*, 1997).

Em consonância com o discutido por Hartman *et al.* (1997), é recomendável direcionar o ar fresco nas rotas principais de entrada e de saída do empreendimento mineiro. Essa prática não apenas visa garantir melhores condições laborais, como através da diluição de gases

danosos à saúde, mas também proporcionar uma segunda saída segura em emergências, como em incêndios, explosões e desmoronamentos no interior de galerias com o fechamento de passagens.

No mesmo sentido, é relevante destacar que, no Brasil, de acordo com as diretrizes estabelecidas pela NRM 04 da Portaria nº 36, de 16 de janeiro de 2015, publicada no Diário Oficial da União em 20/01/2015, no subitem 4.1.6, tem-se uma orientação alinhada com o que foi discutido por Hartman *et al.* (1997).

Conforme essa norma, em cada nível de uma mina subterrânea em operação, é obrigatório manter a comunicação com, no mínimo, duas saídas distintas, com exceção do período de abertura de poços, planos inclinados, chaminés e galerias, desde que já esteja planejada a criação de uma segunda via de saída.

Segundo apresentado por Hartman *et al.* (1997), a disposição ideal das aberturas principais em uma mina consiste em colocar as vias principais de entrada de ar no centro da operação, ou próximo ao centro da mina, e cercar a área de mineração ativa com vias de exaustão de ar. Entretanto, na prática, isso raramente ocorre ou não é continuamente realizado, uma vez que as áreas de mineração ativas estão em constante mudança, ou devido a alterações relacionadas à aquisição de propriedades adicionais no projeto. Em minas de grande profundidade, o número de aberturas que podem ser providenciadas é estritamente limitado por questões de custo. Em minas de carvão mais rasas, porém com grande extensão, são preferíveis combinações de poços de entrada e retornos múltiplos. Consequentemente, o leiaute real das aberturas principais em uma determinada situação deve ser um compromisso, aproximando-se o máximo possível da disposição ideal.

3.12.8 Dispositivos de controle de fluxo de ar

Os dispositivos de controle de fluxo de ar em ambientes subterrâneos são utilizados principalmente para interromper ou bloquear a passagem do ar. O uso desses dispositivos resulta, por sua vez, em um aumento na resistência dos circuitos de ventilação, o que acarreta uma maior necessidade de energia (SIERRA, 2020).

Entre os principais dispositivos de controle de fluxo empregados no setor mineiro, estão:

- Comportas de ar;
- Cortinas defletoras;
- Passagens superiores e inferiores;
- Obstruções e vedações;
- Portas;
- Reguladores.

3.12.9 Ventilação sob demanda

Conforme discutido por Kumar *et al.* (2022), estima-se que o consumo de energia elétrica mundial crescerá a taxa de 1,4 % ao ano, o que trará impactos ambientais e de insegurança energética ainda maiores do que os atuais.

A Ventilação sob Demanda (VOD) é um sistema que permite que a ventilação se adapte melhor as necessidades mineiras reais. A diminuição do fluxo de ar resultante da VOD, acarreta uma redução significativa no consumo de energia. Alguns estudos indicam que a VOD pode economizar até 50% nos custos de ventilação (SIERRA, 2020). Isso significa:

- A ventilação deve ser direcionada exclusivamente para as áreas da mina que necessitam dela, o que geralmente coincide com as zonas ativas da mina;
- Quando a ventilação é essencial em uma área da mina, é importante reconhecer que os requisitos de fluxo de ar podem variar com o tempo;
- Nem todos os sistemas auxiliares precisam operar simultaneamente;
- Provavelmente, os critérios de design originais foram excedidos, portanto, são necessárias mudanças;
- Durante períodos de inatividade operacional, é geralmente suficiente reduzir a ventilação.

A Ventilação sob Demanda pode ser realizada em 5 níveis diferentes, a saber:

- Controle do usuário: Trata-se do controle manual de ventiladores e reguladores para adaptá-los às necessidades de ventilação;
- Agendamento por horário: A mudança nos parâmetros de funcionamento dos ventiladores e reguladores ocorre de acordo com um calendário pré-estabelecido;

- Baseado em eventos: As alterações no sistema de ventilação são feitas em função de atividades e eventos, como detonações ou um incêndio na mina;
- Etiquetagem: O fluxo de ar é distribuído dentro da mina de acordo com um sistema de etiquetas e rastreamento que fornece a localização em tempo real do pessoal e veículos;
- Ambiental: Usando software moderno para monitorar continuamente a concentração de gases (Sistema de Monitoramento Atmosférico, SMA).

O funcionamento adequado do Sistema de monitoramento Atmosférico requer a presença de elementos essenciais, como sensores de gás e fluxo, dispositivos de rastreamento que permitem acompanhar a localização do pessoal e das máquinas em tempo real, uma equipe especializada, bem como sistemas de controle de ventiladores, ou seja, motores com acionamento de frequência variável.

3.12.10 Custos de energia da ventilação

De acordo com McPherson (2009), um ventilador composto por um motor elétrico, sistema de transmissão e impulsor, converte energia elétrica em energia cinética do ar. Essa conversão resulta em um aumento da pressão total do ar que passa através do ventilador. A potência do ar fornecida pelo ventilador é quantificada pela equação (10) que se segue:

$$P_n = P_{tn} \times Q \quad (10)$$

Onde:

- P_n : Potência do ar fornecida pelo ventilador (W);
- P_{tn} : Aumento na pressão total através do ventilador (Pa);
- Q : Fluxo de ar (m^3/s).

Vale destacar que em condições reais de operação, a potência consumida pelo motor de ventilação será maior que a apresentada na equação (10) devido a perdas que ocorrem no motor, transmissão, entre outros itens. Considerando uma eficiência operacional igual a η , a potência de entrada para o motor pode ser representada da seguinte forma:

$$P_n = \frac{P_{tn} \times Q}{\eta} \quad (11)$$

Onde:

- η : eficiência operacional do ventilador.

Assumindo que os custos com energia elétrica são cotados em quilowatt-hora, pode-se concluir que o custo para operar um ventilador 24 horas por dia durante 365 dias por ano seria calculado conforme a seguinte fórmula:

$$C_e = \frac{P_{tn} \times Q}{\eta} \times e \times 24 \times 365 \quad (12)$$

Onde:

- C_e : Custo energético anual para operar um ventilador (R\$/ano);
- e : Custo de energia, em R\$/kWh.

No Brasil, um destaque importante para o contexto supracitado é apresentado na redação da NRM 06 dada pela Portaria n° 36, de 16 de janeiro de 2015, publicada no DOU de 20/01/2015. No subitem 6.1.3 da NRM 06 destaca que em dias em que não haja operação em subsolo, no mínimo 1/3 (um terço) do sistema principal de ventilação deve estar em funcionamento, e nos casos em que existe emanações de gases nocivos, inflamáveis ou explosivos, deve-se manter o sistema em funcionamento integral.

3.12.11 Economia de fluxo de ar

Segundo Hartman *et al.* (1997), a concepção de qualquer sistema de ventilação deve considerar os custos associados ao design de mina no projeto, bem como as variáveis de desempenho do sistema. Dessa forma, quando se considera o desenvolvimento de um sistema de ventilação em uma mina, as variáveis econômicas mais importantes que devem ser consideradas são os custos de possuir e operar o projeto. Os custos são geralmente expressos em uma base de custo anual ou de valor presente, para que a escolha entre as alternativas possíveis possa ser feita com um conjunto comparável de possibilidades.

No que diz respeito aos custos fixos, eles se referem às despesas que ocorrem independentemente de o sistema de ventilação estar em uso ou não. No desenvolvimento de projetos de sistemas de ventilação, o principal custo fixo é o custo de capital associado ao desenvolvimento e aberturas de galerias de ventilação.

Os custos variáveis são aqueles necessários para operar a instalação. Para um sistema de ventilação, o custo variável mais representativo consiste no custo da energia para fornecimento de ar fresco em quantidade projetada nas galerias de ventilação.

Todo esforço deve ser feito para se reduzir a quantidade de ar fresco fornecida ao sistema de ventilação ao menor valor possível. Isso significa que nenhum excesso de ar deve ser fornecido e que as fugas devem ser minimizadas para que a quantidade total de ar fornecido também seja minimizada. Geralmente, os engenheiros responsáveis pelo sistema de ventilação não têm grande controle sobre a quantidade de ar fornecida para cada frente de trabalho porque as quantidades são normalmente ditadas por requisitos de segurança ou legais.

3.13 Metodologia tradicional para planejamento de sistemas de ventilação

Conforme discutido por McPherson (2009), os métodos de planejamento de um sistema de ventilação podem ser conduzidos de forma tradicional ou, como é mais comum atualmente, com o auxílio de softwares especializados. Embora as técnicas tradicionais, isto é, sem dependência específica de meios computacionais, sejam bem desenvolvidas, elas apresentam, quando comparadas às metodologias baseadas em computação, menor versatilidade e detalhamento do planejamento como um todo, mas ainda detém um papel importante na concepção de estimativas de valores genéricos. Nesse sentido, a metodologia tradicional pode ser melhor empregada em projetos, a nível conceitual, no estudo de viabilidade de um novo projeto ou na ampliação de um sistema de ventilação já existente.

A metodologia discutida por McPherson (2009) é apresentada na sequência a seguir:

- Determinação da vazão de ar por meio de técnicas empíricas, como por exemplo, em função da tonelagem, isto é, da produção da mina, como apresentado no subitem 3.12.2.1 deste trabalho;
- Avaliar as necessidades de fluxo de ar para as áreas de desenvolvimento e oficinas mecânicas e elétricas, estimar o fluxo considerando áreas com trabalhos abandonados e outros caminhos que possam resultar em perdas e desvios de ar. Destaca-se que a estimativa de perdas de vazão é provavelmente a maior fonte de imprecisão no planejamento tradicional de ventilação;
- Indicar a vazão de ar estimada no planejamento de mina e compor nesse plano, em cada via de ventilação principal, a vazão de ar, Q ;

- Determinar a velocidade do ar nas vias de ventilação principais do trecho analisado. Quando a velocidade exceder os limites legais previstos na legislação, pode ser necessário instalar ventiladores adicionais ou ajustar a resistência;
- Avaliar a resistência de cada ramificação ao longo das rotas principais de ventilação, utilizando estimativas de resistência, valores baseados na variabilidade local ou dados empíricos;
- Estimar a queda de pressão para cada ramificação principal e indicar esses valores junto ao planejamento do sistema de ventilação da mina;
- A partir da superfície de entrada, traçar um caminho ao longo das vias de ventilação até as áreas de trabalho mais distantes projetadas, voltando pela via de saída até a superfície.

4 COMPARAÇÃO DA NR 22 E NRM 06 PARA VENTILAÇÃO

4.1 Vazão em função do consumo de explosivos

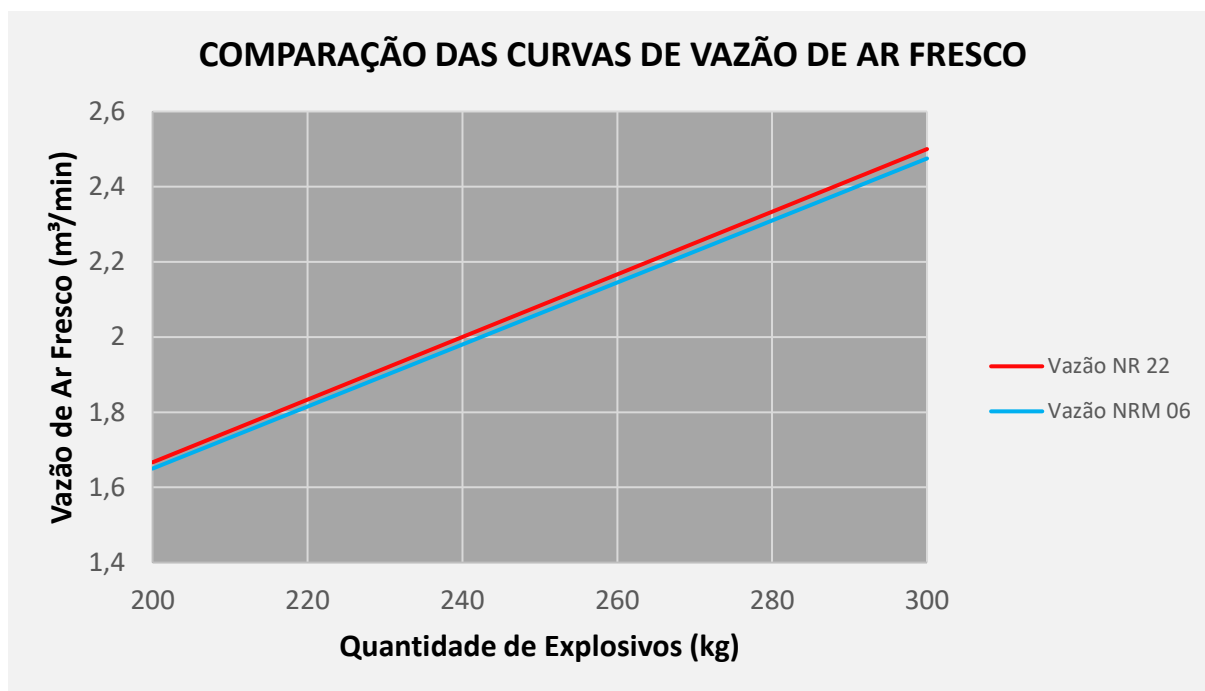
Como apresentado anteriormente, no cálculo de vazão em função do consumo de explosivos, a NR 22 e NRM 06 são divergentes. Enquanto a NR 22 baseia-se somente na quantidade total de explosivos usados por desmonte e no período de aeração necessário, a NRM 06 adiciona a essa equação a consideração do volume de gases produzidos pela detonação dos explosivos.

Para a comparação das equações apresentadas pela NR 22 e pela NRM 06 serão assumidos os seguintes critérios de projeto:

- A quantidade total de explosivos empregada por desmonte, na faixa de 200 a 300 kg;
- Explosivo granulado à base de nitrato de amônio, com um volume gasoso à 25 °C de 990 l/kg, o que corresponde a 0,990 m³/kg de gás gerado;
- Tempo de aeração fixo de 60 minutos após o desmonte na frente de trabalho.

Na Figura 15 demonstra a comparação gráfica das curvas para o resultado da vazão necessárias conforme as duas normas, considerando os critérios de projeto supracitados. Conforme pode-se analisar, o impacto gerado pelo volume gasoso teórico produzido por quilograma de explosivo na determinação da vazão de ar fresco foi uma minoração da vazão alcançada pela equação exposta na NRM 06 em relação a NR22. Os resultados apresentaram uma variação percentual entre 1,5 e 2,5 % de diferença na faixa analisada, isto é, consumindo por desmonte entre 200 e 300 kg de explosivo.

Figura 15 - Vazão de ar em função do consumo de explosivos pela NRM 06 e NR 22



Fonte: Própria do autor, 2023

4.2 Comparação da NRM 06 e NR 22 na determinação de vazão de ar fresco

Este estudo de caso visa comparar as metodologias da NRM 06 e da NR 22 na determinação da vazão de ar fresco em minas subterrâneas. Para comparar as duas normas, assumiu-se as mesmas premissas para o cálculo de vazão em função do número de pessoas ou equipamentos, em função do consumo de explosivos e da tonelagem mensal desmontada.

A seguir, são apresentados os equipamentos a diesel e os critérios de projetos básicos adotados para o dimensionamento da demanda de ar fresco e comparação das normas. Na Tabela 7 são demonstrados os equipamentos a diesel considerados nos cálculos.

Tabela 7 - Detalhamento dos equipamentos a diesel considerados

Equipamentos a Diesel	Quantidade	Potência HP	Total HP	Fator de Utilização	Potência cv
Caminhão CAT AD 30	2	408	816	70%	579
Caminhão TH430 Sandvik	2	350	700	70%	497
Carregadeira LHD 1030 Epiroc	1	250	250	60%	152
Carregadeira LHD 1600 CAT	2	268	536	60%	326
Carregadeira VOLVO L90E	1	166	166	60%	101
Carregadeira JCB	1	100	100	70%	71
Pickup Toyota Hilux	3	177	531	70%	377
Fandrill Sandvik DL421	2	99	198	50%	100
Jumbo 02 Braços Sandvik DD321	2	148	295	60%	179
Plataforma elevatória GENIE	1	170	170	50%	86
Simba Hidráulico Atlas M6C	1	163	163	70%	116
Total	18	2299	3925		2585

Fonte: Adaptado de Costa (2019)

Os critérios gerais assumidos para o cálculo de ar fresco estão apresentados na Tabela 8, a seguir.

Tabela 8 - Critérios de projeto gerais considerados

Critérios de Projeto	Quantidade	Unidade
Consumo médio de explosivos por desmonte	330	kg
Volume de gás gerado por kg de explosivo	0,990	m³/kg
Número máximo de pessoas por turno	55	peessoas
Produção de mensal (ROM)	45.000	t/mês
Tempo de aeração mínimo	60	min

Fonte: Adaptado de Costa (2019)

Na

Tabela 9 é demonstrado o cálculo de vazão para as frentes de trabalho pelos requisitos da NRM 06, assumindo as premissas e equipamentos supracitados.

Tabela 9 - Cálculo de vazão de ar fresco pela NRM 06

No caso de uso simultâneo de mais de um veículo ou equipamento a diesel, em frente de desenvolvimento ou lavra, deve ser adotada a seguinte fórmula para o cálculo da vazão de ar fresco na frente de trabalho:

$$Q_t = 3,5 (P_1 + 0,75 \times P_2 + 0,5 \times P_n)$$

Onde:	Valor	Unid.
P_1 = potência do equipamento de maior potência em operação	290	cv
P_2 = potência do equipamento de segunda maior potência em operação	290	cv
P_n = somatório da potência dos demais equipamentos em operação	2.006	cv
Q_t = vazão total de ar fresco para equipamentos a diesel	5.283	m ³ /min

Vazão Necessária de Ar em Outras Minas (Exceto para Mina de Carvão)

Em função do número máximo de pessoas e máquinas com motores à combustão a óleo diesel:

$$Q_t = Q_1 \times n_1 + Q_2$$

Onde:	Valor	Unid.
Q_1 = quantidade de ar por pessoa	2	m ³ /min
n_1 = número máximo de pessoas no turno	55	pessoas
Q_2 = Vazão de ar para os equipamentos a diesel	5.283	m ³ /min
Q_t = Vazão total de ar fresco	5.393	m ³ /min

Em função do consumo de explosivos:

$$Q_t = (0,5 \times A) \times V / t$$

Onde:	Valor	Unid.
A = Quantidade total de explosivos empregados por desmonte	330	kg
t = tempo de aeração (reentrada) da frente de trabalho em atividade	60	min
V = Volume gasoso gerado por quilo de explosivo	0,990	m ³ /kg
Q_t =	2,72	m ³ /min

Em função da tonelagem mensal desmontada:

$$Q_t = q \times T$$

Onde:	Valor	Unid.
q = vazão de ar para 1000 t desmontadas por mês	180	m ³ /min
T = produção mensal	45.000	t/mês
Q_t = Vazão total de ar fresco	8.100	m ³ /min

Portanto, a vazão requerida de ar fresco nas frentes de trabalho em atividade **8.100 m³/min**

Fonte: Própria do autor, 2023

A Tabela 10 demonstra o cálculo de ar fresco pelos requisitos da NR 22.

Tabela 10 - Cálculo da vazão de ar fresco pela NR 22

Vazão Necessária de Ar em Outras Minas (Exceto para Mina de Carvão)		
Cálculo da vazão de ar fresco em função do número máximo de pessoas ou máquinas com motores a combustão a óleo diesel:		
$Q_t = Q_1 \times n_1 + Q_2 \times n_2$		
Onde:	Valor	Unid.
Q_1 = quantidade de ar por pessoa	2	m ³ /min
n_1 = número máximo de pessoas no turno	55	pessoas
n_2 = número total de cavalo-vapor dos motores a óleo diesel em operação	2.585	cv
Q_2 = Vazão de ar para os equipamentos a diesel (3,5m ³ /min/cv)	9.047	m ³ /min
Q_t = Vazão total de ar fresco	9.157	m ³ /min
Em função do consumo de explosivos:		
$Q_t = (0,5 \times A)/t$		
Onde:	Valor	Unid.
A = Quantidade total de explosivos empregados por desmonte	330	kg
t = tempo de aeração (reentrada) da frente de trabalho em atividade	60	min
Q_t =	2,75	m ³ /min
Em função da tonelagem mensal desmontada:		
$Q_t = q \times T$		
Onde:	Valor	Unid.
q = vazão de ar para 1000 t desmontadas por mês	180	m ³ /min
T = produção mensal	45.000	t/mês
Q_t = Vazão total de ar fresco	8.100	m ³ /min
Portanto, a vazão requerida de ar fresco nas frentes de trabalho em atividade	9.157	m³/min

Fonte: Própria do autor, 2023

Portanto, ao comparar os resultados da NRM 06 e da NR 22, observa-se que os valores da vazão para o caso estudado foram iguais apenas em função da tonelagem desmontada mensal.

5 CONCLUSÃO

Pode-se concluir que a eficiência dos sistemas de ventilação em minas subterrâneas desempenha um papel fundamental em dois aspectos principais: na segurança e na saúde dos trabalhadores, bem como na eficiência operacional de qualquer projeto.

A partir dos levantamentos, também foi observado que as técnicas aplicáveis a projetos de ventilação em minas subterrâneas, assim como os equipamentos utilizados, estão constantemente passando por melhorias e adaptações para atender às demandas do setor mineral.

No que se refere à metodologia de desenvolvimento de um sistema de ventilação sem o auxílio de meios computacionais, ou seja, sem o suporte de softwares especializados, a aplicação da metodologia discutida por McPherson (2009), conhecida como tradicional, é mais adequada para projetos em nível conceitual e em estudos de viabilidade.

Nesse sentido, dada a complexidade dos sistemas de ventilação atuais e a crescente necessidade de processos mais eficientes, bem como a dinâmica própria dos serviços em ambientes de minas subterrâneas, torna-se relevante o uso de meios computacionais para o projeto, monitoramento e obtenção de dados de um sistema de ventilação.

A escolha de um ventilador é influenciada pelas exigências específicas da mina, incluindo a tolerância ao ruído, a demanda por vazão de ar e a intensidade da pressão operacional necessária. Também são consideradas as condições de eficiência em função das particularidades da mina, os custos de manutenção esperados, a resistência do equipamento a ambientes operacionais potencialmente agressivos e a disponibilidade de recursos financeiros para o investimento inicial (CAPEX).

Quanto aos critérios apresentados na NRM 06 e na NR 22, no que se refere aos sistemas de ventilação, as normas apresentaram diferenças relevantes, principalmente nas premissas assumidas para os cálculos destinados à determinação da vazão de ar fresco.

Especificamente, entre as principais diferenças apresentadas entre a NRM 06 e NR 22, quando se mantem os mesmos parâmetros para determinação da vazão de ar fresco em mina

subterrânea para as duas normas, está na forma de como a potência dos equipamentos é considerada na equação do cálculo de vazão de ar fresco em função do número máximo de pessoas e máquinas com motores a combustão a óleo diesel.

Outra diferença entre as duas normas é que NRM 06 considera na equação de determinação de ar fresco em função do consumo de explosivos o volume gerado de gás por quilograma de explosivo, variável que a NR 22 não considera.

Além disso, outro ponto de destaque, é a importância das NRMs na concepção de qualquer projeto no setor mineral, juntamente com a NRM 22 e outras NRs aplicáveis à mineração.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Portaria DNPM nº 36, de 16 de janeiro de 2015**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 20 jan. 2015. Seção 1.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego (MTE). Secretaria Nacional do Trabalho. **NR-15 Atividades e Operações Insalubres**. Brasília, 2002.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego (MTE). Secretaria Nacional do Trabalho. **NR-17 Atividades e Operações Insalubres**. Brasília, 2015.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego (MTE). **NR 22 - Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração**. Brasília, 1999.

CURI, Adilson. **Lavra de Minas**. 1. Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

COSTA, Leandro de Vilhena. **Análise via Simulação da Ventilação em Mina Subterrânea – Estudo de Caso Mina Córrego do Sítio**. Tese (Doutor em Engenharia Mineral) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2019.

ESTON, Sérgio Médici de e IRAMINA, Wilson Siguemasa e ALMEIDA, Ivo Torres de. **Problemas de conforto termo-corporal em minas subterrâneas**. Revista de Higiene Ocupacional. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. Acesso em: 01 nov. 2023.

GANCEV, Boris Ferreira. **Avaliação de condições de qualidade do ar em mina subterrânea**. 2006. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: < <https://repositorio.usp.br/directbitstream/b0534dfe-9b9e-4188-a366-98d3d59bd3e1/BORIS%20FERREIRA%20GANCEV%20PME06.pdf> >. Acesso em: 01 nov. 2023.

HARTMAN, Howard L.; MUTMANSKY, Jan M.; RAMANI, R. V.; WANG, Y. J. **Mine ventilation and air conditioning**. 3 ed. New York: Wiley-Interscience, 1997. 752p.
HERRMANN, Curt. Manual de Perfuração de Rocha. 2 ed. São Paulo. Polígono S.A., 1972. 416p.

KUMAR, Manoj; MAITY, Tanmoy; KIRAR, Mukesh Kumar. Energy Savings Through VOD (Ventilation-on-Demand) Analysis in Indian Underground Coal Mine. **IEEE**. 1 set. 2022. Disponível em: <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3203710>. Acesso em: 06 nov. 2023.

MARTINS, Carla Ferreira Vieira. **Avaliação das Normas Reguladoras de Mineração para Minas Subterrâneas no Brasil e da Legislação Mineral Brasileira para Segurança em**

Subsolo. Dissertação (Mestre em Engenharia Mineral), PPGEM – Universidade Federal de Ouro Preto 2017.

MCPHERSON, M. J. **Subsurface Ventilation Engineering.** Mine Ventilation Services. 2009.

MORAES, Arina Bragança; MONTE-MOR, Juliano de Almeida; SANO, Vinicius Quintanilha. Sistema de ventilação inteligente para minas subterrâneas utilizando redes neurais artificiais e lógica fuzzy. In: **Anais do XLVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, Vitória, ES. Vitória. 30 set, 2016. Disponível em: <
<https://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2016/pdf/156735.pdf> >. Acesso em: 07 nov. 2023.

Poulton, E. C. **Environment and human efficiency.** C.C. Thomas, Springfield, Illinois, U.S.A. 1970.

SIERRA, Carlos. **Mine Ventilation;** A Concise Guide for Students. 1 ed. Suíça: Springer, 2020. 371p.

SOUZA, Petain Ávila de. **Avaliação econômica de projetos de mineração;** Análise de Sensibilidade e Análise de Risco. 1 ed. Belo Horizonte: Instituto de Educação Tecnológica (Ietec), 1995. 247p.

THAKUR, Pramod. **Advanced Mine Ventilation;** Respirable Coal Dust, Combustible Gas and Mine Fire Control. 1 ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2018. 528p.