



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEUS
CURSO DE ENGENHARIA DE MINAS

ANDRÉ LUIS ARAUJO OLIVEIRA

**PROTOTIPAGEM PARA MONITORAMENTO E ANÁLISE DE SISTEMA
DE FLUXO DE AR EM GALERIAS DE MINAS SUBTERRÂNEAS COM O
USO DE SISTEMAS EMBARCADOS, MÓDULOS E SENSORES**

CRATEÚS

2025

ANDRÉ LUIS ARAUJO OLIVEIRA

PROTOTIPAGEM PARA MONITORAMENTO E ANÁLISE DE SISTEMA DE
FLUXO DE AR EM GALERIAS DE MINAS SUBTERRÂNEAS COM O USO DE
SISTEMAS EMBARCADOS, MÓDULOS E SENSORES

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Curso de Engenharia de Minas
da Universidade Federal do Ceará, Campus
Crateús, como requisito parcial à obtenção do
título de bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Me. Emanuel Itaquê
de Negreiros Moreira.

Coorientador: Prof. Dr. José Wellington
Franco da Silva

CRATEÚS

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- O45p Oliveira, André Luis Araujo.
Prototipagem para monitoramento e análise de sistema de fluxo de ar em galerias de minas subterrâneas com o uso de sistemas embarcados, módulos e sensores / André Luis Araujo Oliveira. – 2025.
103 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia de Minas, Crateús, 2025.
Orientação: Prof. Me. Emanuel Itaquê de Negreiros Moreira.
Coorientação: Prof. Dr. José Wellington Franco da Silva.
1. mina subterrânea. 2. ventilação. 3. microcontrolador. 4. automação. I. Título.
- CDD 622
-

ANDRÉ LUIS ARAUJO OLIVEIRA

PROTOTIPAGEM PARA MONITORAMENTO E ANÁLISE DE SISTEMA
DE FLUXO DE AR EM GALERIAS DE MINAS SUBTERRÂNEAS COM O
USO DE SISTEMAS EMBARCADOS, MÓDULOS E SENSORES

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia de Minas do Campus de Crateús da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do grau de bacharel em
Engenharia de Minas.

Aprovada em: 24 de Fevereiro de 2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Emanuel Itaquê de Negreiros Moreira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. José Wellington Franco da Silva (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Bruno do Rego Soares
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Thaíla Ravena Santana Carvalho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico esse trabalho ao meu futuro,
que colherá os frutos desta jornada
de aprendizado e crescimento.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, direciono minha gratidão à força divina que guiou meus passos, concedendo-me resiliência e clareza para superar obstáculos e concluir esta jornada acadêmica. A fé foi a bússola que norteou cada desafio transformado em conquista.

À minha família: meus pais, **Francisca e Erisvaldo**, cujo amor incondicional se traduziu em sacrifícios silenciosos, noites em claro e ensinamentos que moldaram meu caráter. Suas lições sobre integridade, persistência e empatia ecoam em cada escolha que faço. Sou o reflexo de seus valores, e cada conquista minha carrega a marca do seu apoio incansável.

Aos meus avós, **Maria e João**, guardiões das minhas raízes: obrigado por transformarem histórias em legado, momentos simples em memórias eternas e por serem testemunhas fiéis de cada etapa da minha vida. Seus abraços curaram medos, e suas palavras simples sempre carregavam sabedoria.

Ao meu irmão **Nacelio**, que caminhou comigo junto as adversidades: sua presença é um farol de cumplicidade. Cada risada compartilhada, cada conselho sincero e cada gesto de apoio reforçaram que, mesmo em estradas distintas, caminhamos juntos.

Às minhas irmãs, **Ana Paula e Ana Livia**: Vocês são fontes de inspiração. Obrigado pela coragem que me motiva e pela empatia que me ensina. Seu apoio incondicional, risadas e conselhos foram pilares nesta jornada. Esta vitória é nossa. Amo vocês profundamente.

Ao **Tex**, companheiro de quatro patas: suas lambidas despreziosas e olhares leais lembraram-me diariamente que a pureza do afeto não precisa de palavras. Você é a prova viva de que laços verdadeiros transcendem espécies.

Aos professores que iluminaram meu caminho intelectual, em especial ao Prof. Me. **Emanuel Itaquê de Negreiros Moreira** e Prof. Dr. **José Wellington Franco da Silva**, cuja orientação meticulosa, paciência e expertise foram pilares para a concretização deste trabalho. Seu rigor acadêmico e incentivo contínuo desafiaram-me a ir além dos limites que imaginei possíveis.

A meus amigos da universidade e todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para este marco, meu reconhecimento mais profundo. Esta conquista não é apenas minha, mas um mosaico de mãos que me ergueram quando precisei.

À **Universidade Federal do Ceará (UFC)**, todo seu corpo docente e todos os colaboradores.

Com humildade e orgulho, dedico estas páginas a quem acreditou, mesmo quando eu duvidei.

“Acredite em si mesmo e no que você é. Saiba que há algo dentro de você que é maior do que qualquer obstáculo.”

(Christian D. Larson).

RESUMO

Em minas subterrâneas os processos de medição do fluxo de ar para reconhecimento do sistema de ventilação são fundamentais para o bom condicionamento desses locais. As principais condições adversas nesses ambientes são: presença de gases nocivos, temperatura alta e umidade excessiva. Deste modo, a ventilação adequada proporciona uma melhor qualidade do ar paralelamente ao conforto térmico nos locais de operações. Diante disso, têm-se buscado soluções tecnológicas alternativas por meio de softwares que possam auxiliar no monitoramento e regulação do fluxo de ar em galerias de minas subterrâneas, assim, aumentando a eficiência de controle do processo sistemático do fluxo de ar. Isto posto, o objetivo do trabalho é identificar maneiras alternativas de monitoramento do sistema de ventilação em minas subterrâneas por meio de microcontroladores, módulos e sensores que proporcionam um monitoramento e análise do fluxo de ar por telemetria. Para tanto, foi planejado e desenvolvido um protótipo de transmissão e recepção de dados por meio de um microcontrolador, sensor óptico, sensor de identificação de gás, sensor de temperatura, umidade, altitude e pressão atmosférica, trabalhando em conjunto em um sistema móvel passível de ser controlado e deslocado até os ambientes de medição do fluxo de ar. Desta forma, o protótipo gerado conseguiu identificar e medir temperatura, umidade, pressão atmosférica e altitude através do sensor BME280, além de, medir a concentração de gases como: Monóxido de carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO₂), Butano, GLP e/ou Fumaças. Por fim, foi utilizado o sensor óptico para medir o fluxo de ar através de uma curva produto de uma calibração do anemômetro, embarcada no protótipo, em um ambiente controlado. Espera-se que, com a calibração mais precisa dos sensores, melhoria na construção e o aumento da robustez do protótipo este possa ser aplicado em ambientes de minas subterrâneas.

Palavras-chaves: mina subterrânea; ventilação; microcontrolador; automação.

ABSTRACT

In underground mines, airflow measurement processes for assessing ventilation systems are essential for proper environmental conditioning. The main adverse conditions in these environments include the presence of harmful gases, high temperatures, and excessive humidity. Thus, adequate ventilation ensures better air quality alongside thermal comfort in operational areas. Consequently, alternative technological solutions have been sought through software to aid in monitoring and regulating airflow in underground mine galleries, thereby enhancing the efficiency of systematic airflow control. Given this, the objective of this work is to identify alternative methods for monitoring ventilation systems in underground mines using microcontrollers, modules, and sensors that enable telemetry-based airflow monitoring and analysis. For this purpose, a prototype was designed and developed for data transmission and reception using a microcontroller, optical sensor, gas identification sensor, temperature sensor, humidity sensor, altitude sensor, and atmospheric pressure sensor. These components work together in a mobile system that can be controlled and deployed to airflow measurement environments. The resulting prototype successfully identified and measured temperature, humidity, atmospheric pressure, and altitude using the BME280 sensor. It also measured gas concentrations such as carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO₂), butane, LPG, and/or smoke. Finally, an optical sensor was used to measure airflow via a calibration curve derived from an anemometer embedded in the prototype and tested in a controlled environment. It is expected that with more precise sensor calibration, improved construction, and increased prototype robustness, this system can be applied effectively in underground mine environments.

Keywords: underground mine; ventilation; microcontroller; automation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Métodos de lavra em mina subterrânea.	24
Figura 2 - Representação do método de câmaras e pilares.	25
Figura 3 - Métodos de lavra subterrânea em depósitos por alargamento abertos.	26
Figura 4 - Lavra por recalque usando o transporte gravitacional e chutes para o carregamento das vagonetas.	27
Figura 5 - <i>Layout</i> do método de subníveis.	28
Figura 6 - <i>Layout</i> do método de corte e enchimento.	29
Figura 7 - <i>Layout</i> do método de alargamento esteados.	30
Figura 8 - <i>Layout</i> do método de estruturas retangulares.	31
Figura 9 - <i>Layout</i> do método de abatimento em subníveis.	32
Figura 10 - <i>Layout</i> do método de abatimento em blocos.	33
Figura 11 - Etapas para desenvolvimento de mina subterrânea.	34
Figura 12 - Corpo de minério profundo acessado por rampas helicoidais.	36
Figura 13 - <i>Layout</i> típico do fluxo de ventilação em aberturas primárias.	38
Figura 14 - Etapas gerais de desenvolvimento em mina subterrânea.	39
Figura 15 - Carreta jumbo com duas lanças para perfuração.	40
Figura 16 - Operações com LHD em galerias de mina subterrânea.	41
Figura 17 - Operações com caminhão de baixo porte para carregamento de material em mina subterrânea.	42
Figura 18 - Condições ambientais subterrâneas.	43
Figura 19 - Interação entre os componentes físico-químicos e o homem no ambiente subterrâneo.	43
Figura 20 - Equipamento diesel em operação (LHD) e trecho elementar do ambiente subterrâneo.	44
Figura 21 - Profusão ou quantidade de lesões no pulmão devido a poeira mineral	57
Figura 22 - Esquema de um sistema básico de ventilação de mina.	60
Figura 23 - Ventilação auxiliar por exaustão.	61
Figura 24 - Ventilação auxiliar soprante.	61
Figura 25 - Ventilação auxiliar por exaustão com reforço soprante.	62
Figura 26 - Ventilação auxiliar soprante com reforço por exaustão.	62
Figura 27 - Instrumentos de medição em ventilação de mina subterrânea.	64

Figura 28 - Determinação do perfil de velocidades	65
Figura 29 - Curva do sistema de ventilação e de perdas.....	70
Figura 30 - Desenvolvimento da indústria e da mineração.	71
Figura 31 – NodeMCU ESP8266 Pinos.	74
Figura 32 - Desenvolvimento de aplicações para ESP8266.	75
Figura 33 - Aplicações da Internet das Coisas.....	76
Figura 34 - Visão simplificada de um sistema de telemetria de transmissão, recepção, gravação e visualização.	77
Figura 35 - (a) Configuração da Bluetooth (b) LAN sem fios.	79
Figura 36 - Etapas do projeto.....	80
Figura 37 - Sensor óptico, disco encorder.	81
Figura 38- (a) Cooler de computador e (b) rolamento tipo “harley”.....	82
Figura 39- Sensor BME280.	82
Figura 40- (a) Sensor MQ2 e (b) Sensor MQ7.	83
Figura 41 - Módulo Ponte H – L298N.....	83
Figura 42- (a) Partes do chassi de MDF e (b) Conjunto roda motor.	84
Figura 43- Planejamento do protótipo no tinkercad.	85
Figura 44- Planejamento do protótipo no tinkercad.	86
Figura 45 Campo de monitoramento do Blynk da medição dos sensores.	87
Figura 46– Teste dos sensores de temperatura, umidade e concentração de fumaças e gases.....	88
Figura 47– Protótipo montado durante teste do sensor BME280 através da excitação de uma fonte de calor.	89
Figura 48- Gráfico de temperatura.....	90
Figura 49- Gráfico de umidade do ar.....	91
Figura 50- Gráfico da pressão atmosférica.....	92
Figura 51- Gráfico de altitude.....	92
Figura 52– Experimento para captação de concentração de gases em ambiente confinado.	93
Figura 53- Gráfico de concentração de monóxido de carbono.	94
Figura 54– Desconfinamento do ambiente para dispersão dos gases e fumaça.	94
Figura 55- Gráfico de concentração de combustíveis e fumaça.	95
Figura 56- Medição no túnel de vento com o protótipo.	96

Figura 57- Medição no túnel de vento com o anemômetro profissional.	96
Figura 58- Gráfico de calibração do protótipo.	97

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tipos de aberturas em minas subterrâneas.	35
Quadro 2 - Segmentos de condicionamento individual.	45
Quadro 3 - Calor específico de determinadas rochas brasileiras.	48
Quadro 4 - Condutividade térmica de algumas rochas brasileiras.	49
Quadro 5 - Difusividade térmica de algumas rochas brasileiras.	50
Quadro 6 - Produtos da combustão incompleta do diesel.	52
Quadro 7 - Valores de IBUTG expressos em °C.	54
Quadro 8 - Limites de tolerância para os gases mais comuns.	59
Quadro 9 - Velocidades limites do ar em subsolo.	67
Quadro 10 - Velocidades do ar recomendadas.	68

LISTA DE SIGLAS

- ADC** – Analog-to-Digital Converter (Conversor Analógico-Digital)
- ANFO** – Ammonium Nitrate Fuel Oil (Explosivo à Base de Nitrato de Amônio)
- API** – Application Programming Interface (Interface de Programação de Aplicações)
- Blynk** – Plataforma de IoT para monitoramento remoto
- BME280** – Sensor de Temperatura, Umidade e Pressão
- CH₄** – Metano
- CO** – Monóxido de Carbono
- CO₂** – Dióxido de Carbono
- DDR** – Double Data Rate (Memória RAM)
- DPM** – Diesel Particulate Matter (Material Particulado do Diesel)
- EPA** – Environmental Protection Agency (Agência de Proteção Ambiental – EUA)
- ESP32** – Microcontrolador avançado da Espressif
- ESP8266** – Microcontrolador NodeMCU
- H₂S** – Gás Sulfídrico
- I²C** – Inter-Integrated Circuit (Barramento de Comunicação de Dados)
- IBUTG** – Índice de Bulbo Úmido Termômetro de Globo
- IoT** – Internet das Coisas
- L298N** – Módulo Ponte H (Controle de Motores)
- LAN** – Local Area Network (Rede Local)
- LCD** – Liquid Crystal Display (Tela de Cristal Líquido)
- LHD** – Load, Haul, Dump (Carregadeira de Mineração)
- LVDS** – Low Voltage Differential Signaling (Sinalização Diferencial de Baixa Voltagem)
- MQ2** – Sensor de Gases Inflamáveis
- MSHA** – Mine Safety and Health Administration (Administração de Segurança e Saúde em Minas – EUA)
- N₂** – Nitrogênio
- NEMA** – National Electrical Manufacturers Association (Associação Nacional de Fabricantes Elétricos)
- NH₃** – Amônia
- NIOSH** – National Institute for Occupational Safety and Health (Instituto Nacional de Segurança e Saúde Ocupacional – EUA)
- NO_x** – Óxidos de Nitrogênio

NR – Norma Regulamentadora

NR-15 – Norma Regulamentadora 15 (Atividades e Operações Insalubres)

O₂ – Oxigênio

Pa – Pascal (Unidade de Pressão)

PCB – Printed Circuit Board (Placa de Circuito Impresso)

Ppm – Partes por Milhão (Unidade de Concentração de Gases)

PWM – Pulse Width Modulation (Modulação por Largura de Pulso)

RPM – Rotação por Minuto

SDK – Software Development Kit (Kit de Desenvolvimento de Software)

SO₂ – Dióxido de Enxofre

SPI – Serial Peripheral Interface (Interface Serial Periférica)

TCA – Temperatura Crítica de Autocombustão

TM – Telemetria

UART – Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (Receptor-Transmissor Assíncrono Universal)

WAN – Wide Area Network (Rede de Longa Distância)

WiFi – Wireless Fidelity (Conectividade sem fio)

SÚMARIO

1 INTRODUÇÃO.....	19
1.1 JUSTIFICATIVA	21
1.2 OBJETIVOS	22
1.2.1 Objetivo geral	22
1.2.2 Objetivo específico	22
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
2.1 Métodos de lavra.....	23
2.1.1 Alargamentos autossuportados	24
2.1.2 Alargamentos suportados.....	28
2.1.3 Alargamentos abatidos.....	31
2.2 Desenvolvimento de mina subterrânea.....	33
2.2.1 Tipos de Aberturas Subterrâneas	35
2.2.2 Galerias de ventilação	37
2.3 Operações em mina subterrânea.....	39
2.3.1 Perfuração e desmonte	39
2.3.2 Carregamento e transporte	41
2.4 Condições ambientais de minas subterrânea.....	42
2.5 Fontes naturais de calor	45
2.5.1 Autocompressão	45
2.5.2 Gradiente térmico	46
2.5.3 Condutividade térmica e transferência de calor da rocha desmontada.....	46
2.5.4 Calor específico	47
2.5.5 Condutividade e difusividade térmica	48
2.6 Fontes artificiais de calor	50
2.6.1 Calor sensível.....	51

2.6.2 Calor latente	51
2.6.3 Calor proveniente do óleo diesel	52
2.7 Efeitos do calor no organismo humano	53
2.8 Determinação do volume de ar devido a fontes poluidoras	55
2.8.1 Concentração máxima de poeira mineral	56
2.8.2 Concentração máxima de gases	58
2.9 Sistema de ventilação.....	59
2.9.1 Aspectos regulamentares	63
2.9.2 Equipamentos eletrônicos aplicado ao monitoramento do fluxo de ar em minas subterrâneas	64
2.10 Condições adversas	65
2.10.1 Qualidade ideal do fluxo de ar	66
2.10.2 Requisitos técnicos para determinação de vazão do ar.....	67
2.11 Mineração 5.0	71
2.12 Sistemas embarcados.....	73
2.12.1 Microcontroladores	73
2.12.2 ESP8266	74
2.13 Internet das coisas (IOT)	76
2.14 Telemetria.....	77
2.15 Transmissão de dados Wireless	78
3 MATERIAIS E MÉTODOS	80
3.1 Planejamento.....	80
3.2 Montagem do protótipo e teste dos sensores	84
3.2.1 Tinkercad	85
3.2.1 Pseudocódigo	86
3.2.2 Blynk.....	87
3.3 Validação do protótipo	88

4 RESULTADOS E DISCURSÕES.....	90
4.1 Temperatura	90
4.2 Umidade.....	90
4.3 Pressão atmosférica	91
4.4 Altitude	92
4.5 Monóxido de Carbono.....	93
4.6 Metano, Butano, GLP e/ou Fumaça.....	94
4.7 Túnel de vento	95
5 CONCLUSÃO.....	99
REFERÊNCIAS.....	100

1 INTRODUÇÃO

Silva (2005) define lavra como uma atividade do setor primário que implementa um conjunto de operações unitárias para a extração de minério. Ao longo da história, foram desenvolvidos vários métodos para extração. Estes são chamados métodos de lavra, que podem ser divididos em dois grupos: a céu aberto ou subterrâneos, cada um com um conjunto complexo de características. Em uma mesma mina podem ser utilizados mais de um método de lavra, que podem variar ao longo da sua vida útil.

De acordo com Pinto (2006), para o desenvolvimento de minas subterrâneas, é de extrema importância a realização da avaliação das condicionantes ambientais, as quais, irão garantir a higiene e segurança dos trabalhadores. Dentre essas condicionantes, a disponibilidade de ar fresco é um dos principais parâmetros de controle para a adequação de um planejamento de lavra subterrânea. Desta forma, faz-se necessária a instalação de um sistema de ventilação artificial, com o objetivo de manter os fluxos de ar nas galerias e frentes de trabalho em qualidades requeridas, para que os níveis de concentração de gases, vapores e poeiras, bem como temperatura e umidade permaneçam dentro dos limites toleráveis, viabilizando a saúde ocupacional, outrossim, para manter o conforto térmico ambiental.

Segundo Torres e da Gama (2005), os gases presentes no ar de ambientes subterrâneos em certas concentrações não são nocivos, mas, à medida que suas concentrações aumentam ou diminuem, ou se ocorre exposição prolongada, podem originar efeitos negativos para a saúde dos operadores e, inclusivamente, podem provocar a morte. A exposição prolongada em condições térmicas desfavoráveis conduz inevitavelmente ao aumento da temperatura no organismo e, como consequência, produz efeitos fisiológicos que reduzem seu rendimento e até provocam a morte, com temperaturas superiores a 42 °C e em tempo prolongado.

A Norma Regulamentadora (NR) 22 orienta sobre os critérios a serem adotados para a instalação de um sistema de ventilação onde, é fundamental que o sistema seja capaz de fornecer as vazões de ar adequadas e a renovação contínua do ar, através do auxílio de equipamentos que permitam uma velocidade do ar eficaz. Deste modo, vê-se que a ventilação de mina subterrânea é necessária para adequação do ambiente em que se desenvolvem as atividades de lavra, por conta da exposição de trabalhadores aos riscos supramencionados.

Um sistema de ventilação bem dimensionado e controlado pode manter ambientes de mina subterrânea em condições saudáveis de trabalho e com custos otimizados. Vê-se, assim, a necessidade de se monitorar os fluxos gerados por um ventilador de mina subterrânea de modo

que, a partir de sensores, se consiga sempre manter fluxos com vazões suficientes, medidas e controladas, de modo a aumentar a eficiência destes tipos de sistema.

Para avaliar as velocidades de fluxos de ar de uma região é necessária a coleta de dados das movimentações do ar com precisão, capaz de fornecer um mapeamento eólico da região. De acordo com Almeida (2019), a velocidade e a direção do fluxo de ar são medidas com aparelhos denominados anemômetros. Esses aparelhos normalmente possuem três ou mais pás girando ao redor de um polo vertical. Em geral há dois tipos de anemômetros, o de conchas e o de hélice.

Este trabalho objetiva construir um protótipo móvel para medição e monitoramento do fluxo de ar, temperatura, umidade, pressão atmosférica, altitude e concentração de gases como: Monóxido de carbono, Dióxido de carbono, Butano GLP e/ou Fumaças em ambiente controlado.

1.1 JUSTIFICATIVA

Em uma mina subterrânea o fornecimento de um fluxo de ar adequado para as frentes de trabalho é vital devido a presença de contaminantes, sejam eles de origem natural ou emitidos artificialmente, com o objetivo de garantir o bom condicionamento desses ambientes para os trabalhadores. Porém, os custos para a instalação e monitoramento de um sistema de ventilação podem ser elevados.

Através de pesquisa bibliográfica, verificou-se que existem poucos estudos presentes na literatura científica referentes à utilização de microcontroladores para o monitoramento do fluxo de ar em galerias e frentes de lavra.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Monitorar e analisar o fluxo de ar em tempo real, por telemetria, utilizando sistemas embarcados em um protótipo móvel.

1.2.2 Objetivo específico

- Construir um protótipo de anemômetro;
- Medir temperatura, umidade, altitude, pressão atmosférica e concentração de gases através de sensores eletrônicos;
- Criar um sistema de gestão de dados através da telemetria;
- Gerar relatórios dos dados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

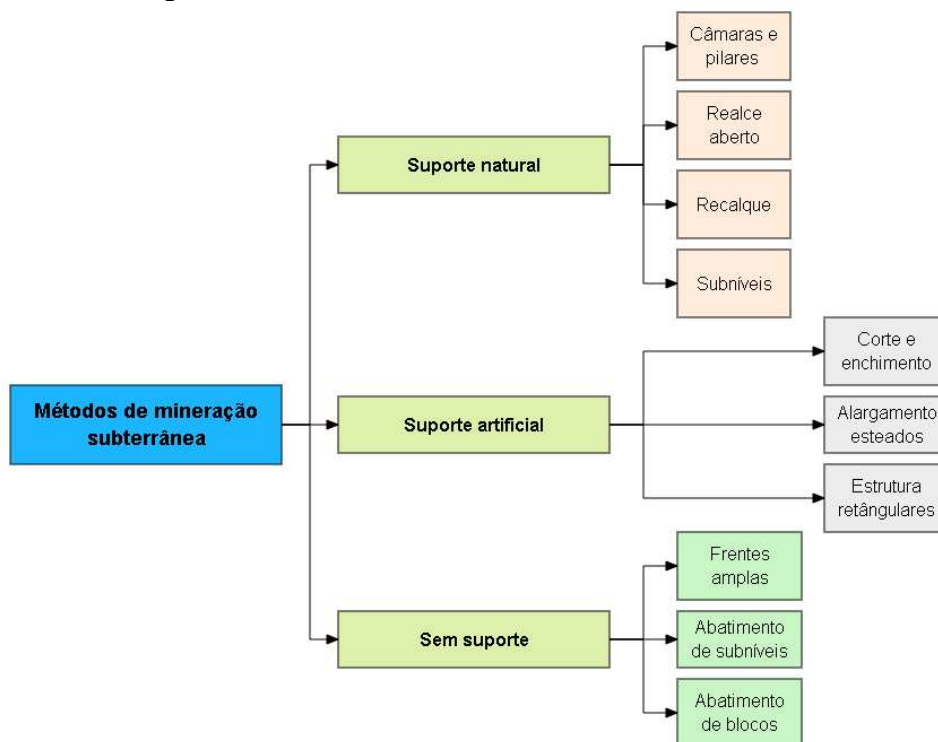
Neste capítulo serão apresentados fundamentos sobre os métodos de lavra, desenvolvimento de mina e operações mineiras relacionadas ao desmonte, carregamento e transporte em mina subterrânea. Também, será feita uma explanação sobre os sistemas de ventilação sincronizados ao uso de componentes eletrônicos como microcontroladores para o monitoramento, análise de dados e automação do sistema de fluxo de ar em frentes de trabalho, utilizando os princípios de telemetria aplicados a indústria 4.0 com aplicações fundamentadas a Internet das coisas.

2.1 Métodos de lavra

A lavra de uma reserva mineral pode ocorrer de duas maneiras, a céu aberto e/ou subterrânea. Entretanto, ambos os métodos possuem suas peculiaridades, a seleção do método de lavra é um dos principais elementos, em qualquer análise econômica de uma mina, e sua escolha permite o desenvolvimento da operação. Comumente o método de lavra é designado como sendo a técnica de extração do material. Isso define a importância de sua seleção, já que todo o projeto é elaborado em torno da técnica utilizada para lavar o depósito. Na fase de planejamento a escolha é baseada em critérios geológicos, sociais, ambientais levando sempre em consideração, segurança meio ambiente e saúde. Aspectos relativos à estabilidade, recuperação de minério, produtividade e diluição nos métodos também devem ser considerados ao se fazer a escolha. (Macêdo et al. 2001).

Para Curi (2017) existem três principais grupos de métodos de lavra subterrânea, denominados alargamentos autossuportados, alargamentos suportados e alargamentos abatidos, como ilustrado na Figura 1. Estes serão selecionados e aplicados considerando as questões geotécnicas: a sustentação e o controle da deformação nas aberturas do maciço rochoso e rochas encaixantes. Os métodos de lavra estão constantemente sendo otimizados através de novas tecnologias. Neste sentido, a implementação desses métodos não se restringe diretamente ao desenvolvimento e operações de uma mina subterrânea, mas também podem proporcionar o reaproveitamento de minas a céu aberto muito profundas, antieconômicas e/ou com uma relação de estéril muito maior que a de minério.

Figura 1 - Métodos de lavra em mina subterrânea.



Fonte: Adaptado Curi (2017).

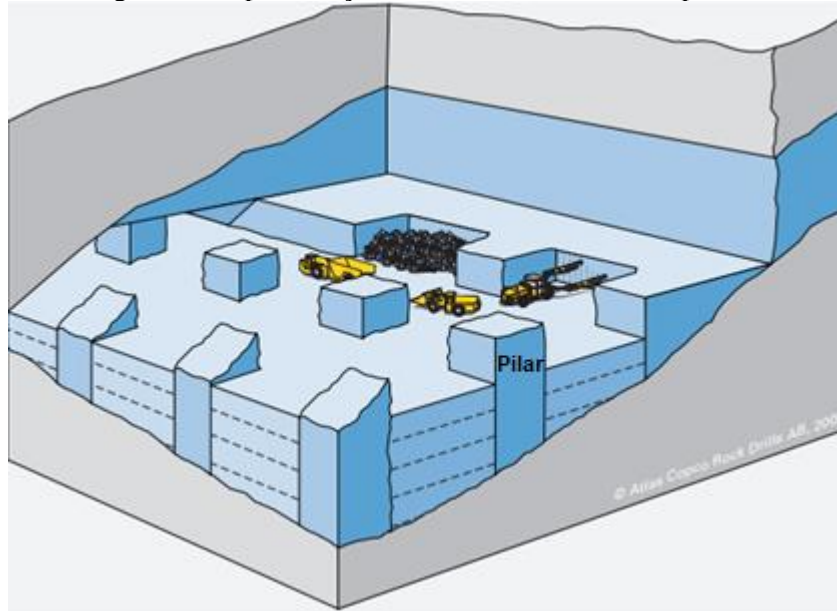
2.1.1 Alargamentos autossuportados

Neste grupo de métodos de lavra, as características do minério e das rochas encaixantes permitem a abertura de determinados espaços subterrâneos sem suporte ou auxílio de estrutura artificial. Nesse caso, é usado o princípio do abandono de pilares. Assim, as cargas do peso próprio das rochas sobrejacentes são absorvidas por suportes naturais do próprio maciço rochoso. Os métodos de lavra que se enquadram neste grupo são: câmaras e pilares, realces ou alargamento abertos, lavra por recalque e lavra por subníveis. Para esses tipos de lavra o uso desses suportes naturais é indispensável, entretanto, acaba reduzindo a recuperação na lavra e a produtividade (Curi, 2017).

Para Hartman e Mutmansky (2002) o método de lavra por câmaras e pilares (*room and pillar*) é amplamente utilizado na mineração subterrânea, caracterizando-se pela extração seletiva do minério enquanto se deixam pilares para sustentar o teto da mina. A estabilidade desses pilares depende de fatores como a resistência da rocha e a geometria adotada na lavra.

como ilustrado na Figura 2. De acordo com Atlas Copco Rock Drills AB (2007) o método é aplicado para depósitos planos e acamados de espessura limitada, como por exemplo, depósitos sedimentares como xisto de cobre, calcário ou arenito contendo chumbo, veios de carvão, camadas de sal e potássio, calcário e dolomita.

Figura 2 - Representação do método de câmaras e pilares.

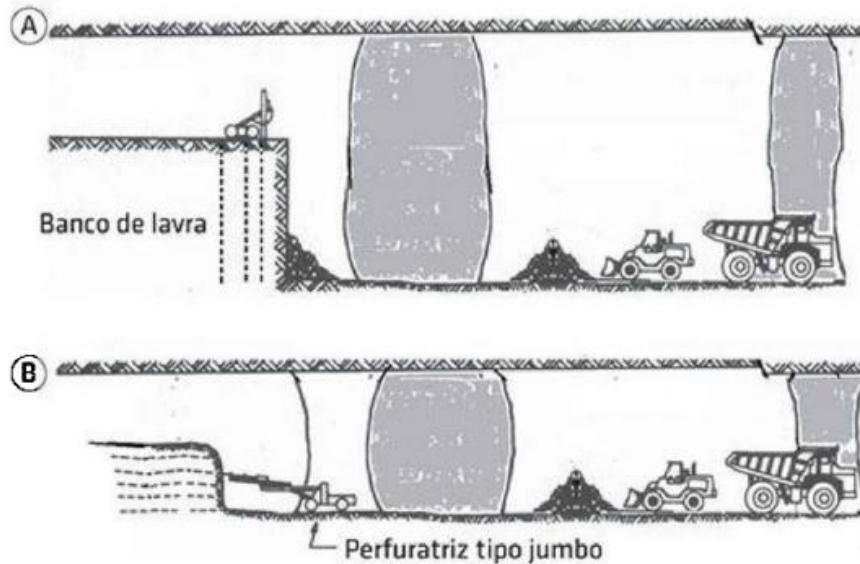


Fonte: (ADAPTADO ATLAS COPCO ROCK DRILLS AB, 2007).

O método de realces ou alargamentos abertos, praticamente idêntico ao de câmaras e pilares, é o mais usado dentre todos os métodos de lavra subterrânea específicos para rochas duras, sendo intensivamente empregado em todo o mundo (Curi, 2017). Neste método, os pilares não possuem forma e tamanho definidos (Figura 3), além de não apresentarem uma localização sistemática, estando muitas vezes dispostos aleatoriamente em regiões compostas de minério de baixo teor. O método é apropriado para a lavra de depósitos não carboníferos (depósitos de carvão), requerendo suporte natural por meio de pilares (ATLAS COPCO ROCK DRILLS AB, 2007).

Figura 3 - Métodos de lavra subterrânea em depósitos por alargamento abertos.

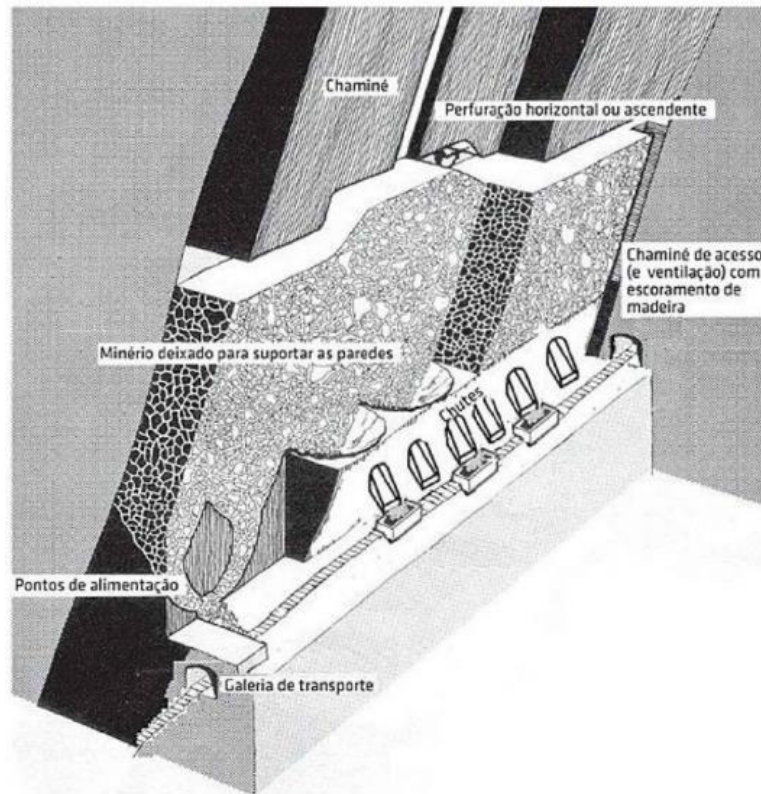
- (A) alargamento por parapeitos seguidos por bancadas e avanço frontal através de perfuração vertical;
(B) alargamento por parapeito seguidos por bancada e avanço frontal através de perfuração horizontal.



Fonte: Adaptado Tatiya (2005) apud Curi (2017).

A lavra por recalque (*shrinkage*) é uma modalidade de lavra ascendente na qual o minério é desmontado em tiras horizontais a partir da parte de baixo da abertura projetada e na direção de seu topo. O material desmontado é acumulado na mesma abertura, servindo de suporte para as paredes do alargamento e plataforma para os mineiros onde será feito o carregamento e transporte. Também chamado de método de armazenamento ou método de lavra estacionária, esse método se baseia em uma abertura vertical ou quase vertical. Assim, estando em função de um ângulo geral maior que o ângulo de repouso natural do minério desmontado, agindo em função da gravidade, como ilustrado na Figura 4 (Curi, 2017). Darling (2011), afirma que, o método é geralmente aplicado a blocos de extração muito estreitos e, tradicionalmente, não se prestavam a muita mecanização. Método aplicável com sucesso na mineração de metais preciosos de alta qualidade devido à sua baixa diluição e baixa perda de minério.

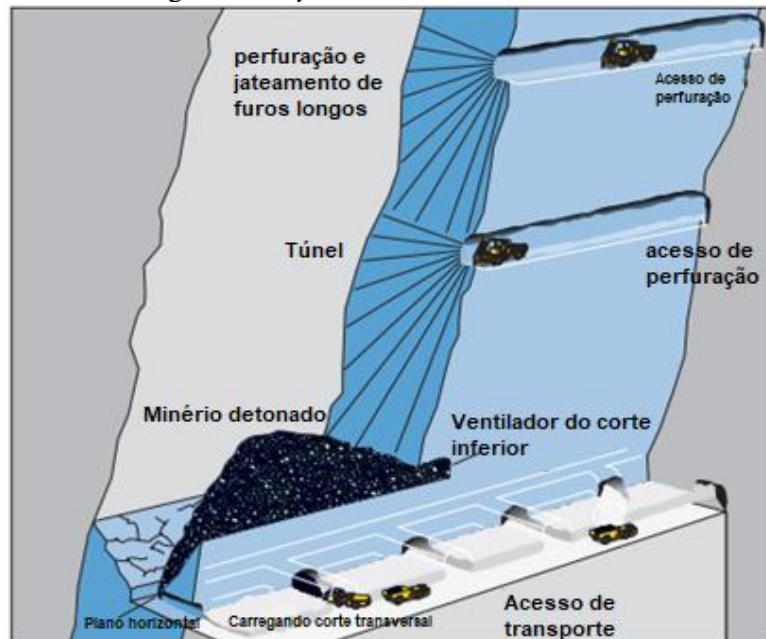
Figura 4 - Lavra por recalque usando o transporte gravitacional e chutes para o carregamento das vagonetas.



Fonte: Adaptado Tatiya (2005) apud Curi (2017).

De acordo com Curi (2017) o método de lavra por subníveis (*sublevel stopping*) é indicado na extração de corpos de minério muito inclinados com encaixante competente e de espessura considerável. Neste método, o corpo de minério é verticalmente dividido em níveis, onde, entre cada par de níveis adjacentes, as aberturas são efetuadas segundo o padrão e as dimensões mais convenientes, como representado na Figura 5. Tatiya (2005), indica que, o corpo de minério é dividido verticalmente em níveis, onde o nível superior é desenvolvido para as operações de desmonte, enquanto o nível inferior é usado como nível para coleta e transporte do minério. Darling (2011), afirma que, o material desmontado é transportado por gravidade, no qual, durante a extração, as aberturas criadas devem permanecer abertas. Depois da extração, as aberturas podem ser preenchidas ou mantidas, e os pilares, entre os realces, podem ser extraídos ou deixados no local.

Figura 5 - *Layout* do método de subníveis.



Fonte: (ADAPTADO ATLAS COPCO ROCK DRILLS AB, 2007).

2.1.2 Alargamentos suportados

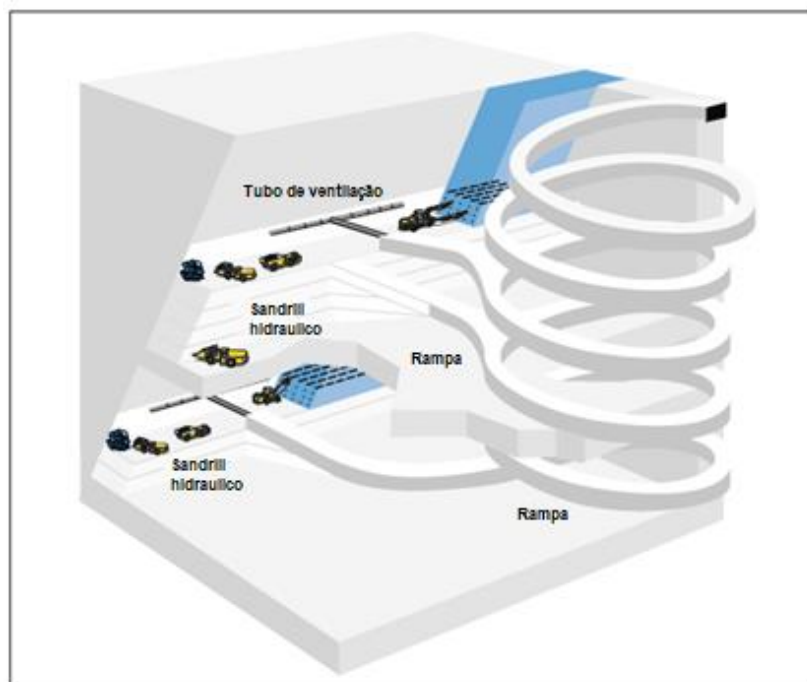
De acordo com Curi (2017), esse método é definido por um sistema de estruturas artificiais de suporte com o intuito de absorver uma parcela significativa da carga resultante do peso das rochas sobrejacentes. De acordo com o mesmo autor, os suportes artificiais podem ser de esteios (rígidos ou deformáveis, de madeira ou metálico, estes últimos, quando deformáveis, de atrito ou hidráulico), pilhas (baterias de esteios, fogueiras, pilares artificiais e suportes hidráulicos auto enchentes), quadros (de madeira, e concreto ou metálico), arcos (de concreto ou metálico, rígidos, articulados e deslizantes), ancoragens (parafusos de rochas) e, por fim, o enchimento (manual – com materiais de diversas naturezas, pneumáticos ou hidráulico). Nessa classe, encontra-se os métodos denominados corte e enchimento, alargamento esteados e estruturas retangulares.

Segundo Darling (2011) o método de corte e enchimento (*cut-and-fill*) é o termo descritivo amplo aplicado à métodos que exigem que os vazios escavados sejam preenchidos com material para facilitar a continuação da produção de minério. Este preenchimento é necessário para fornecer suporte para aberturas subsequentes ou para fornecer uma plataforma de trabalho para mineração adicional. Os métodos de corte e enchimento podem ser aplicados em conjunto com outros métodos convencionais. Por sua vez, Curi (2017) indica que, o corpo

de minério é desmontado em tiras ou fatias e o espaço vazio criado pela abertura é preenchido por algum

tipo de material, como por exemplo, pedras, britas, areia, rejeitos de beneficiamento mineral ou mesmo outros materiais duros de alta densidade. O enchimento pode ser feito manualmente por estéril ou com o auxílio de bombas mecânicas, pneumáticas ou hidráulicas. Portanto, a aplicação do método permite que a área preenchida seja usada como plataforma de suporte para prosseguimento dos trabalhos como ilustrado na Figura 6. Por suas peculiaridades, esse método é adaptável a uma vasta gama de condições do maciço rochoso, inclusive aqueles mais difíceis.

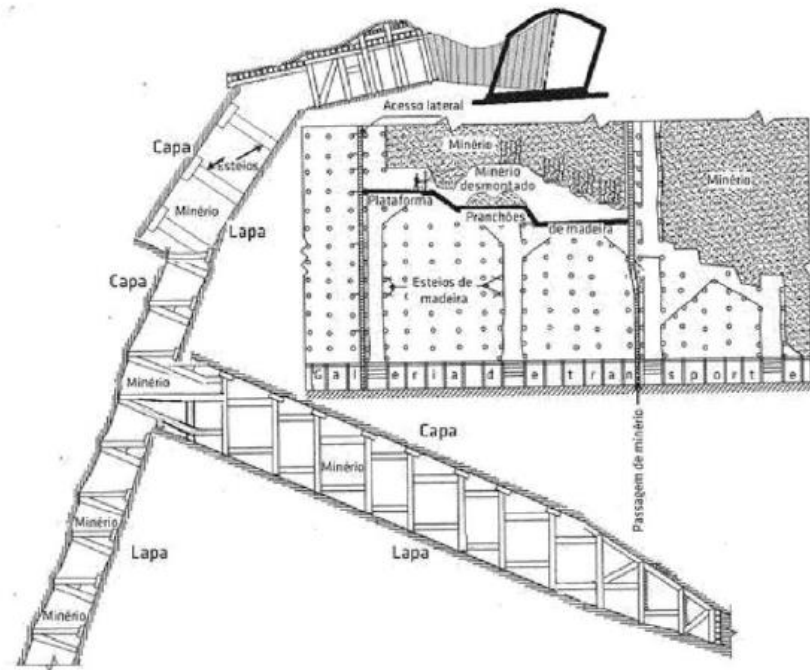
Figura 6 - *Layout* do método de corte e enchimento.



Fonte: (ADAPTADO ATLAS COPCO ROCK DRILLS AB, 2007).

Curi (2017) diz que, o método de alargamentos esteados considera o uso histórico de madeira, empregado na estrutura de sustentação das aberturas de acordo com a representação na figura 7. Com o passar do tempo, por razões econômicas e ambientais, a madeira foi substituída por material pétreo, cerâmico ou metálico, sem envolver o princípio do enchimento parcial ou total aplicando o método a casos muito específicos. Não há diferença entre esses métodos e os métodos de alargamento abertos, a não ser pelo fato de que os esteios não são ocasionais, limitando a partes instáveis, mas sistematicamente distribuídas. Iniciada a abertura do alargamento, são assentados os esteios, mantendo distância de alguns metros na frente de desmonte e entre os esteios sucessivos, em cada fila.

Figura 7 - Layout do método de alargamento esteados.

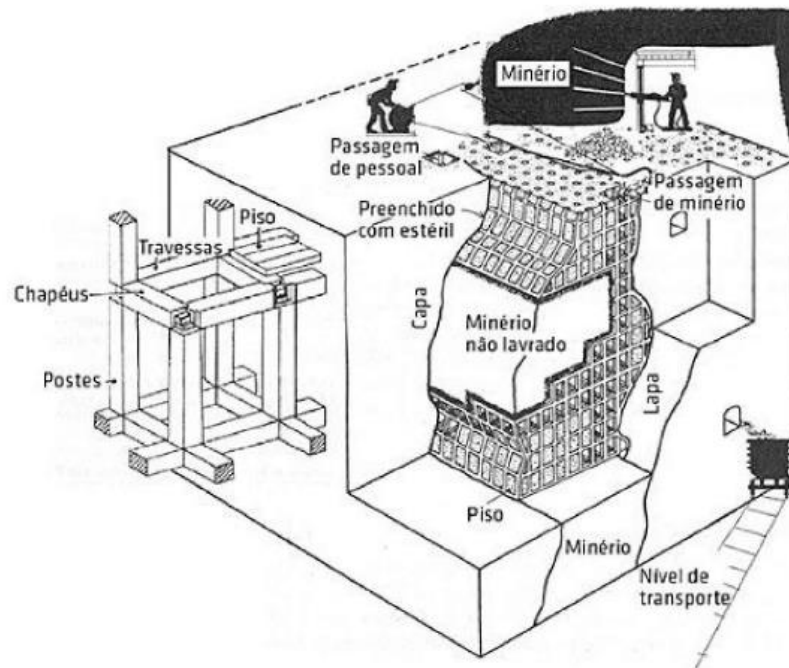


Fonte: Adaptado Tatiya (2005) apud Curi (2017).

O método de estruturas retangulares (*square-set stoping*) é um dos mais interessantes, porque demonstra como a lavra de minas, mesmo no passado longínquo, pode ser efetuada sob as condições mais adversas, desde que fosse aplicado suporte adequado para a manutenção das aberturas (Curi, 2017). Hartman e Mutmansky (2002) afirmam que o método é provavelmente o menos utilizado de todos os métodos de lavra discutidos até então, além de ser muito oneroso.

No método de estruturas retangulares, pequenos blocos de minério são sistematicamente extraídos e substituídos por uma estrutura prismática de conjuntos de madeira, enquadrados em uma estrutura de suporte e preenchimento, nível por nível, para fornecer suporte substancial para as rochas circundantes. Cada conjunto de madeira consiste em um poste, travessas chapéus e piso, como mostrado na Figura 8. O método é bastante versátil e pode iniciar horizontalmente nas porções inferiores e/ou superiores do corpo de minério com a lavra continuada de forma ascendente ou descendente. É capaz de aplicação ao minério e rocha menos resistentes (Hartman e Mutmansky, 2002).

Figura 8 - *Layout* do método de estruturas retangulares.



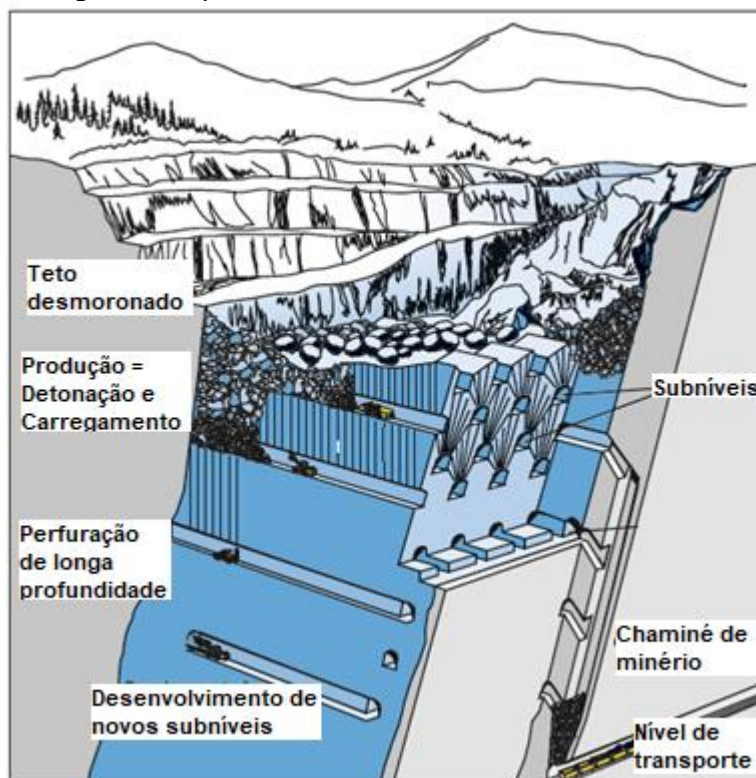
Fonte: Adaptado Tatiya (2005) apud Curi (2017).

2.1.3 Alargamentos abatidos

Os métodos de abatimento são definidos com base na forma e posição espacial do corpo de minério e as características mecânicas do maciço. Essa classe abrange os métodos de frentes amplas, abatimento de subníveis e abatimento de blocos. Logo, pode ser aplicado a minérios friáveis de fácil desmonte, no qual, facilitam o processo de lavra utilizando o conceito de desabamento do maciço rochoso para efetuar a exploração sem o uso de suporte (Curi, 2017).

O método de abatimento em subníveis (*sublevel caving*) é um dos métodos de lavra subterrânea caracterizado pelo fluxo de material fragmentado de granulometria grosseira, que é o fator mais importante na aplicação do método. A lavra do minério é iniciada pela perfuração vertical ascendente em leques. Posteriormente, após o desmonte, o minério é transportado para dentro dos níveis através das passagens de minério estrategicamente posicionadas que conduzem o minério por gravidade para o nível de transporte principal, como ilustrado na Figura 9. Uma grande quantidade de minério pode ser abandonada, ocasionando uma perda de produção (DE LA VERGNE, 2014).

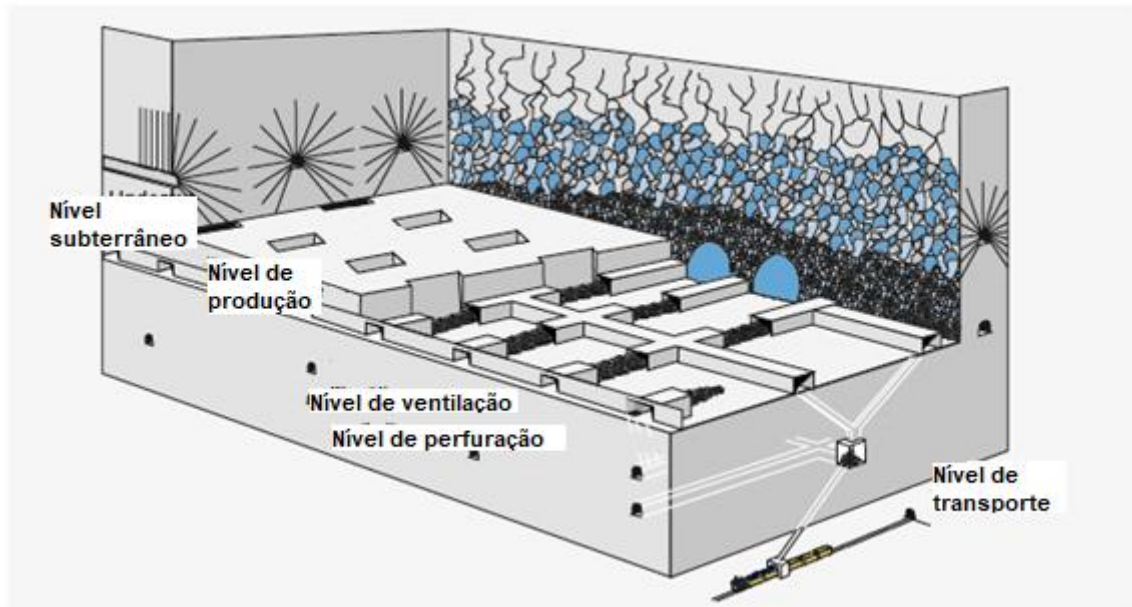
Figura 9 - *Layout* do método de abatimento em subníveis.



Fonte: (ATLAS COPCO ROCK DRILLS AB, 2007).

O método de abatimento em blocos (*block caving*) consiste no rebaixamento das colunas de rocha o suficiente para desmoronar sob o próprio peso da coluna, como representado na Figura 10. O acesso a zona de minério é desenvolvido por galerias que envolve um investimento de capital significativo em pré-produção. O desenvolvimento pode ser arriscado devido ao alto tempo e custo, assim, necessitando da consulta de um especialista para estudo e planejamento da escavação. Constitui-se em um método aplicável a corpos de minério largos e maciços, de grande mergulho (acima de 45°), de grande espessura (de 30 a 200 m); baixo teor (ex. cobre e molibdênio) (DE LA VERGNE, 2014).

Figura 10 - *Layout* do método de abatimento em blocos.



Fonte: (ATLAS COPCO ROCK DRILLS AB, 2007).

2.2 Desenvolvimento de mina subterrânea

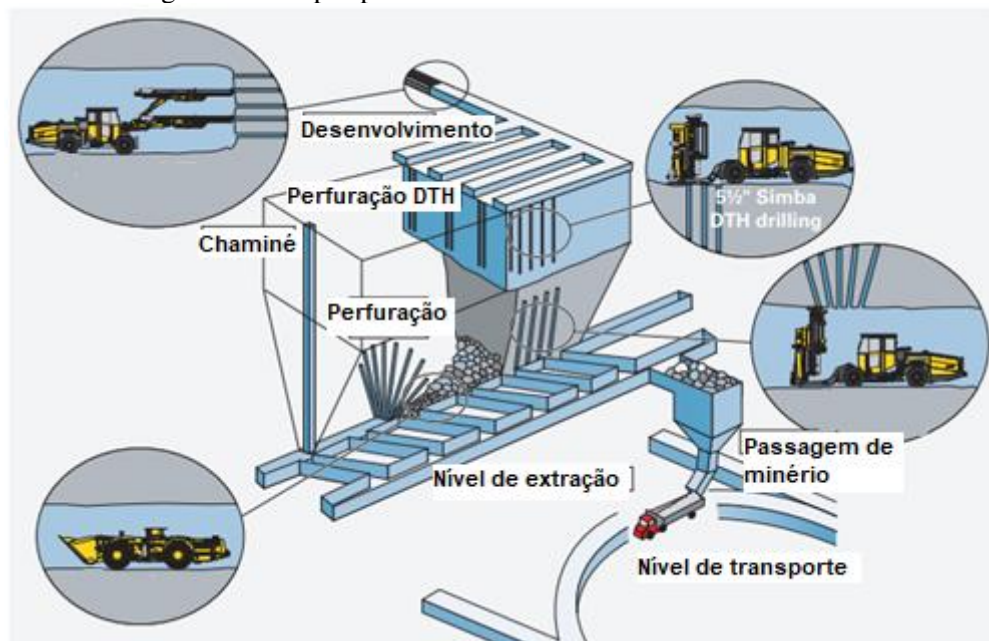
Há quatro fases da mineração a saber: prospecção, exploração, desenvolvimento e lavra. Entretanto, os serviços de produção propriamente ditos estão concentrados nas fases de desenvolvimento e lavra (Curi, 2017). Nesse sentido, os serviços de desenvolvimento em mina subterrânea podem ser prévios ou simultâneos com a lavra. Hartman e Mutmansky (2002) afirmam que, o desenvolvimento da mina deve prosseguir considerando todos os aspectos do projeto geral da mina. Devido à complexidade e custo da mineração subterrânea, cuidados devem ser adotados na tomada de decisões durante o desenvolvimento, que também podem afetar as operações de produção subsequentes.

Em uma mineração subterrânea, a atenção é centrada na seleção de um método de lavra. O desenvolvimento não deve prosseguir até que um plano de produção da mina seja adotado, e o primeiro passo é decidir qual classe de método subterrâneo é mais adequado: suportados, autossuportados e de abatimento. A razão pela qual a escolha de um método é tão crucial se deve ao fato de este governar amplamente o tipo e localização das aberturas de desenvolvimento primário. Todas as aberturas de acesso devem estar localizadas fora da zona de fraturamento do maciço rochoso por questões geomecânicas. Se a integridade da rocha sobrejacente à área de mineração possa assegurar a estabilidade, as aberturas primárias podem ser localizadas mais centralmente acima do depósito (Hartman e Mutmansky, 2002)

Curi (2017) afirma que, o projeto de lavra é definido como: puros ou exploratórios, quando se destinam apenas ao melhor conhecimento do depósito mineral; prévios ou simultâneos com a lavra, desde que muitos serviços precisam ser feitos antecipadamente para suportar a produção, enquanto outros podem ser executados simultaneamente com esta; sistemáticos ou supletivos, sendo os primeiros ligados ao planejamento estratégico geral de produção, e os últimos, mais táticos, objetivando atender conveniências ou imposições locais específicas e; produtivos ou obras mortas, conforme o desenvolvimento seja efetuado no corpo de minério, gerando produção, ou executado nas encaixantes em rochas estéreis.

Os procedimentos citados por Curi (2017) preveem o desenvolvimento sistemático, concebido concomitantemente com o método de lavra selecionado, que possibilita o acesso aos vários horizontes da jazida, bem como a subdivisão do corpo mineral em unidades de desmonte adequadas. O desenvolvimento sistemático deve contemplar dois grupos principais de serviço: as vias de acesso principais e o desenvolvimento secundário, abrangendo a interligação do corpo de minério às vias de acesso principais como ilustrado na Figura 11, além de, as demais aberturas como chutes, chaminés, subníveis, entre outras.

Figura 11 - Etapas para desenvolvimento de mina subterrânea.



Fonte: (ATLAS COPCO ROCK DRILLS AB, 2007).

2.2.1 Tipos de Aberturas Subterrâneas

De acordo com Hartman e Mutmansky (2002) as aberturas de desenvolvimento subterrâneo podem ser classificadas em três categorias, por ordem de importância no *layout* geral da mina:

1. Primário: Aberturas principais (por exemplo, poço: inclinados ou verticais);
2. Secundário: Aberturas de nível ou zona (por exemplo, galerias);
3. Terciário: Aberturas laterais ou de painel (por exemplo, rampas e travessas).

O desenvolvimento supletivo citado por Curi (2017) é imposto pelas necessidades locais, podendo contar de passagens de minérios, vias de ventilação ou esgotamento de águas, entre outras. Uma mina subterrânea admite diversos tipos de abertura, executadas com propósitos distintos e que podem ser agrupadas em duas categorias, considerando a relação entre as suas dimensões:

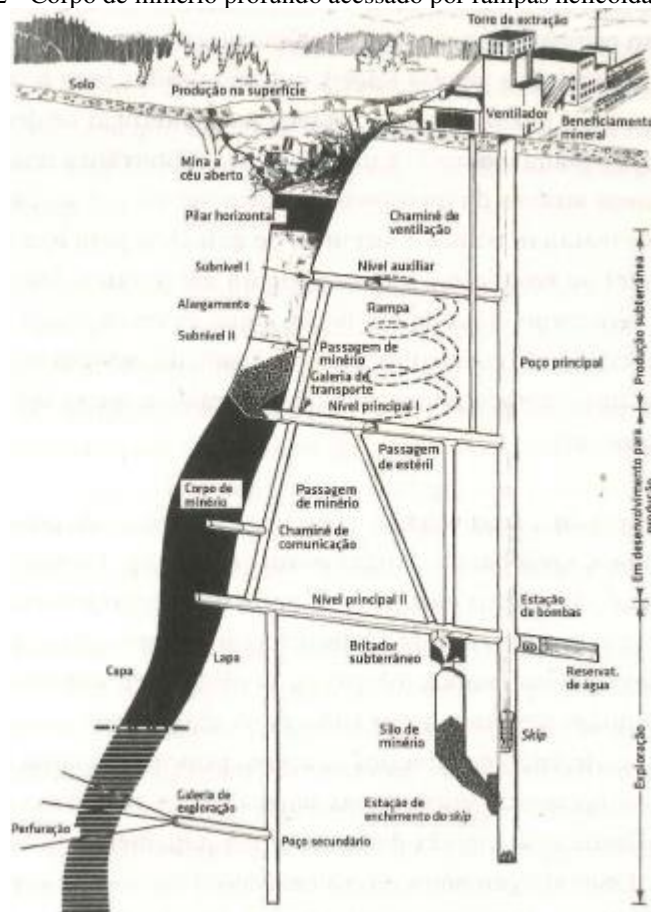
Quadro 1 - Tipos de aberturas em minas subterrâneas.

Aberturas com desenvolvimento linear	Seções transversais com dimensões reduzidas se comparadas com o comprimento	Poços	Verticais
			Inclinados
		Rampas	Aclives e declives
		Galerias	Túneis
			Cabeceiras
			Galerias
			Subidas (<i>raises</i>)
			Descidas (<i>winzes</i>)
			Chaminés
			Passagens de minério
			Passagens de estéril
			Passagens de pessoas e materiais em geral
Aberturas com desenvolvimento volumétrico	Dimensões são da mesma ordem de grandeza, independentemente da direção considerada	Alargamentos ou realces (<i>stopes</i>)	Métodos aplicados
		Câmaras com utilidades diversas	Silos, salas de máquinas, área de oficinas refeitórios, dentre outros.

Fonte: Adaptado Curi (2017).

Curi (2017) cita que as vias de acesso primário são primordiais, pois permitem alcançar a jazida em um ou mais horizontes, assim, promovendo a lavra das reservas minerais. Geralmente, esses acessos são complementados por desenvolvimento subsidiário. Caso o minério esteja alocado em apenas uma camada horizontal, ou sub-horizontal, situada a pouca profundidade da superfície, este pode ser acessado por meio de rampas. Caso o corpo de minério encontrar-se a uma maior profundidade, o acesso a ele pode ser obtido por meio de rampas helicoidais construídas na lapa da jazida, como ilustrado na Figura 12. Dessas rampas sairiam galerias de transporte horizontal paralelas a maior extensão do corpo de minério. Nas extremidades das galerias de transporte poderão ser construídos poços para a ventilação.

Figura 12 - Corpo de minério profundo acessado por rampas helicoidais.



Fonte: Hamrin (1986) apud Curi (2017).

Geralmente, as aberturas são conduzidas nesta ordem; isto é, desde aberturas principais de desenvolvimento até aberturas secundárias ou de zona e, além dessas, são feitas as aberturas terciárias, como aberturas laterais ou de painel. No entanto, existem muitas variações com diferentes métodos. Por exemplo, na mineração de carvão, as entradas e os cortes transversais

associados são sempre conduzidas ao mesmo tempo, independentemente da categoria das entradas (Hartman e Mutmanky, 2002)

Uma série de decisões iniciais relacionadas com as aberturas de desenvolvimento primário de uma mina deve ser feita no início do estágio de planejamento da mina. Hartman e Mutmanky (2002) relacionam essas decisões ao tipo, número, forma e tamanho das aberturas principais. Por necessidade, essas decisões são normalmente feitas quando o sistema de manuseio de materiais primários é escolhido. Os fatores que influenciam nessas decisões incluem a profundidade, a forma e o tamanho do depósito, topografia de superfície, condições naturais e geológicas do minério, rocha encaixante, método de lavra e taxa de produção.

2.2.2 Galerias de ventilação

César (2017) afirma que o ar atmosférico ao percorrer, no interior das minas, as galerias e frentes de trabalho, sofre uma série de alterações químicas e físicas, provocando mudanças na sua composição, com diminuição do conteúdo de oxigênio, geralmente acompanhada do aumento dos conteúdos de anidrido carbônico, nitrogênio e vapor d'água, além de agregar gases tóxicos e explosivos (monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, gás sulfídrico, dióxido de enxofre, metano e outros) e poeiras diversas. Ocorrem, ainda, alterações de temperatura, umidade relativa e peso específico. Por sua vez Tatiya (2005) descreve que o ar fresco, gerado por um ventilador na superfície, é fornecido na frente através de dutos rígidos e flexíveis, suspensos na lateral do poço de acordo com a representação na Figura 13.

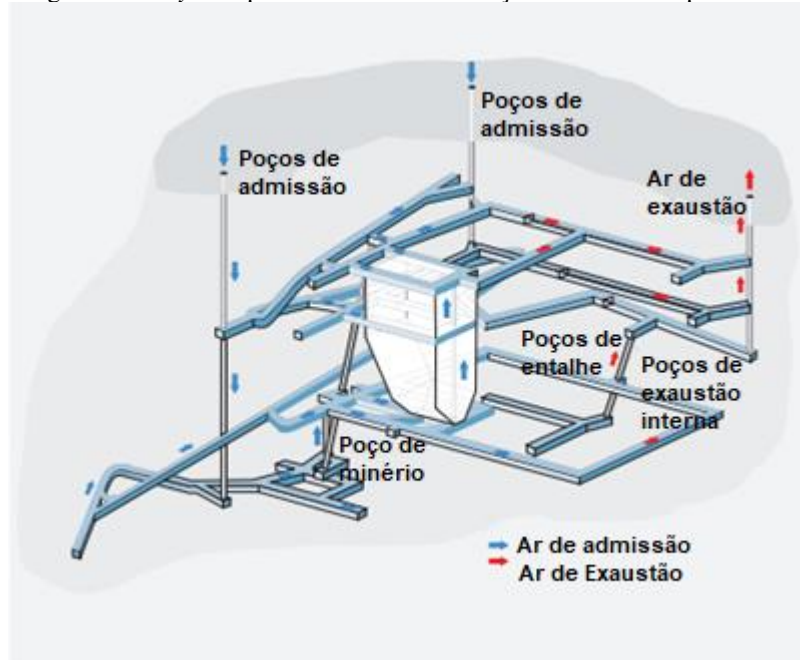
De acordo com Vilhena Costa (2019), a velocidade do ar também é importante para manter as necessidades de fluxo de ar do circuito de ventilação principal e auxiliar, considerando o número de pessoas trabalhando no local, os gases produzidos pelos motores a diesel, a necessidade de remover a temperatura excessiva devido ao calor, máquinas de operação e a velocidade máxima do ar permitido por norma. As concentrações e temperaturas dos gases aumentam rapidamente sem um suprimento adequado de ar, piorando as condições ambientais dos trabalhadores, bem como sua eficiência.

As fontes mecânicas geradoras de fluxo de ar são principalmente os ventiladores, além de compressores e injetores que poderão eventualmente ser utilizados. Um ventilador eleva a pressão do ar no seu lado de saída para um valor acima da pressão deste ar no seu lado de entrada. O fluxo de ar resultante da utilização destes equipamentos recebe a denominação de

“ventilação mecânica” ou “ventilação artificial”, sendo este tipo de fluxo, na maioria dos casos, o principal componente de um sistema de ventilação de uma mina subterrânea (César, 2017).

O fluxo de ar existente entre dois pontos de uma mina é causado por uma diferença de pressão entre eles. Cesar (2017) indica que, as diferentes pressões existentes em pontos distintos da mina são geradas por fontes naturais ou mecânicas. A principal fonte natural com potencial de criar e manter um fluxo significativo de ar é a energia térmica resultante de diferenças de temperatura, que ocasiona alterações de densidade do ar em setores distintos da mina, também representado na Figura 13.

Figura 13 - *Layout* típico do fluxo de ventilação em aberturas primárias.



Fonte: (ATLAS COPCO ROCK DRILLS AB, 2007).

César (2017) afirma que a localização usual do ventilador principal é no topo da chaminé ou abertura de retorno, caracterizando um “sistema aspirante” ou “por sucção”. Em minas pouco profundas com rocha fraturada, e em minas com velhos locais de trabalho apresentando comunicações com a superfície, a posição ideal para o ventilador é no topo da chaminé ou abertura de entrada, caracterizando um “sistema soprante” ou “por sobrepressão”. Do ponto de vista termodinâmico, a melhor localização para o ventilador é na base da chaminé de saída, caracterizando um “sistema misto”. Para se exercer o controle do fluxo de ar, torna-se necessária a utilização de diversos dispositivos, tais como: paredes de alvenaria, cortinas, portas de ventilação (simples e duplas), reguladores, entre outros. A ventilação em minas subterrâneas

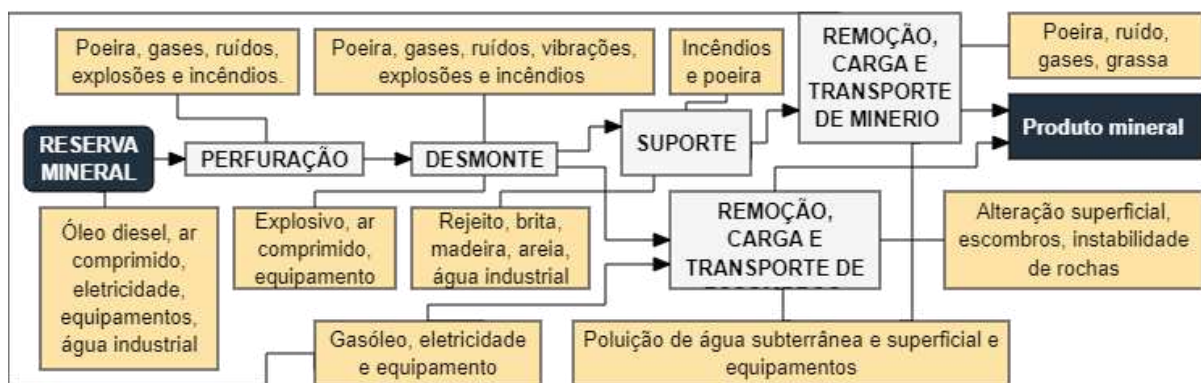
é extremamente necessária para se manter condições ambientais saudáveis para a execução das operações de produção dentro da mina.

2.3 Operações em mina subterrânea

Germany (2002) afirma que, o padrão de operações unitárias em subsolo é condicionado por dois grandes grupos: aqueles característicos de rochas duras e os característicos de rochas friáveis. O tipo de equipamento utilizado para a operação de lavra em mina subterrânea corresponde com as características geométricas e geomecânicas do maciço rochoso do minério e encaixantes. Os principais equipamentos utilizados, em um contexto mais moderno, compreendem carretas de perfuração tipo jumbo, carregadeiras rebaixadas tipo LHD (*Load, Haul, Dump*), caminhões de baixo porte, mineradores contínuos e equipamentos de transporte tipo *shuttle cars*.

De acordo com Torres e da Gama (2005), as operações em mina subterrânea têm relação com as fontes de contaminação ou poluição ambiental. Nesse sentido, estão relacionadas com as atividades do ciclo operacional, que em termos gerais são: perfuração, desmonte, suporte, remoção, carga e transporte de mineral e/ou estéril, ilustrados na Figura 14, que ocasionam a contaminação da atmosfera subterrânea. Além disso, há riscos ambientais pela alteração do escoamento das águas subterrâneas, drenagem ácida e pela queda e desprendimento de rochas.

Figura 14 - Etapas gerais de desenvolvimento em mina subterrânea.



Fonte: ADAPTADO TORRES E DA GAMA (2005).

2.3.1 Perfuração e desmonte

De acordo com Germany (2002), a perfuração frontal para o desenvolvimento de galerias e rampas é feita, sempre que possível, com o uso de carretas de perfuração tipo jumbo

(Figura 15), provendo assim qualidade e produtividade. Outro tipo de carreta com geometria diferente é utilizado para executar furos de produção, permitindo a perfuração paralela ou em leques. A perfuração eletro-hidráulica vem se tornando cada vez mais popular para o desenvolvimento e furos de produção de menores diâmetros, até cerca de 76 mm utilizando-se martelos de topo de furo. Acima desses diâmetros, prevalece o uso de perfuração pneumática, sempre que possível com o uso de martelos de fundo de furo, com menores desvios. O uso de perfuração descendente de diâmetro mais largo (<6”) permitiu o desenvolvimento de métodos de abertura verticais mais seguros, como os *drop raises*, onde se emprega o conceito de *crater blasting*.

Figura 15 - Carreta jumbo com duas lanças para perfuração.



Fonte: (ATLAS COPCO ROCK DRILLS AB, 2007).

O uso de explosivos tipo nitrato de amônia com óleo combustível (ANFO) é bastante difundido em minas subterrâneas e as emulsões são utilizadas como primers. Desmontes mais modernos utilizam emulsões bombeadas, com o carregamento mecanizado junto à face, tal como é feito nas minas a céu aberto. O uso de espoletas de retardo não-elétricas, popularizado durante os anos 1980, tem contribuído para a melhoria do desempenho dos desmontes e das condições de segurança. As espoletas eletrônicas mais modernas, tipo IKON, estão ainda sendo introduzidas a título demonstrativo, o custo é ainda bastante elevado e seu uso só tem sido justificado em aplicações muito específicas (GERMANY, 2002).

De acordo com o mesmo autor, o advento do paralelismo automático nos jumbos e do uso de espoletas de retardo não-elétricas com maior precisão dos tempos de retardo, tem

permitido aumentar a extensão da perfuração de galerias de 3,20 m para 4,40 m e extensões maiores, alcançando-se, ao mesmo tempo, maiores eficiências de avanço. Após desmontada a porção do maciço rochoso pretendida, é dado início à operação de carregamento e transporte.

2.3.2 Carregamento e transporte

O uso de sistemas de injeção eletrônica são populares no Brasil e tem permitido que os equipamentos de carga e transporte a diesel tornem-se cada vez mais eficientes em termos do consumo de combustível, melhorando, também, o desempenho no tocante às emissões dos gases de escape. As condições mais favoráveis, quanto à introdução de eletrônica embarcada e as condições mais restritivas quanto à segurança dos trabalhos, vêm vulgarizando o uso de unidades remoto controladas para as atividades mais perigosas, em particular a carga do minério em realces, o que é característico de sistema de lavra sem pontos de carga (GERMANY, 2002). Além disso, Germany (2002) cita os principais equipamentos de carregamento, como por exemplo, LHD (Figura 16) e caminhões de baixo porte (Figura 17).

Figura 16 - Operações com LHD em galerias de mina subterrânea.



Fonte: (ATLAS COPCO ROCK DRILLS AB, 2007).

Germany (2002) afirma que, algumas precauções devem ser tomadas, principalmente no que diz respeito aos riscos de equipamentos autônomos perderem o sinal ou se desligarem no modo remoto no interior dos realces. Os sistemas de controle, principalmente para aceleração e desaceleração, devem ser precisos e sensíveis à carga, permitindo operação suave do equipamento, evitando danos ao sistema de transmissão. Outra preocupação refere-se ao balanceamento do equipamento com e sem carga, que, se não for muito equilibrado, ocasiona

patinamento e consumo excessivo de pneus. Como o operador não está a bordo do equipamento e o estado da pista é dificilmente mantido em boas condições, os esforços excessivos sobre os sistemas de escavação e de articulação são comuns, o que exige cuidados adicionais quanto à inspeção e manutenção. Resulta que estes equipamentos possuem vida útil menor que outros empregados em condições similares em desenvolvimento ou sistemas de lavra com pontos de carga.

As operações de lavra em minas subterrâneas elencadas até o presente tópico degradam as condições ambientais para o trabalho em minas subterrâneas, gerando riscos que necessitam de mitigação.

Figura 17 - Operações com caminhão de baixo porte para carregamento de material em mina subterrânea.

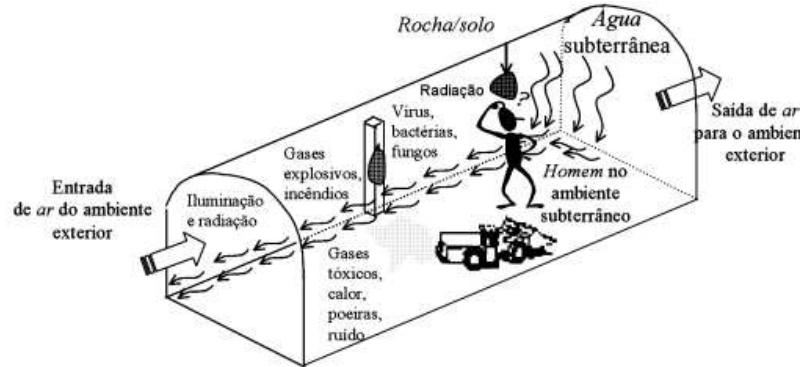


Fonte: (ATLAS COPCO ROCK DRILLS AB, 2007).

2.4 Condições ambientais de minas subterrânea

De acordo com Hartman (1991), no vácuo do espaço sideral, os astronautas humanos contam com a atmosfera artificial de uma nave espacial para seu sistema de suporte de vida. Embora diferindo na localidade e missão, os mineiros humanos não são menos dependentes de uma atmosfera artificial para sustentá-los em minas subterrâneas onde o ar pode estar estagnado e contaminado. É evidente que tanto os mineiros quanto os astronautas enfrentam um ambiente hostil como ilustrado na Figura 18, e que ambos os grupos devem depender de um sistema de ventilação para fornecer-lhes ar adequado para respirar.

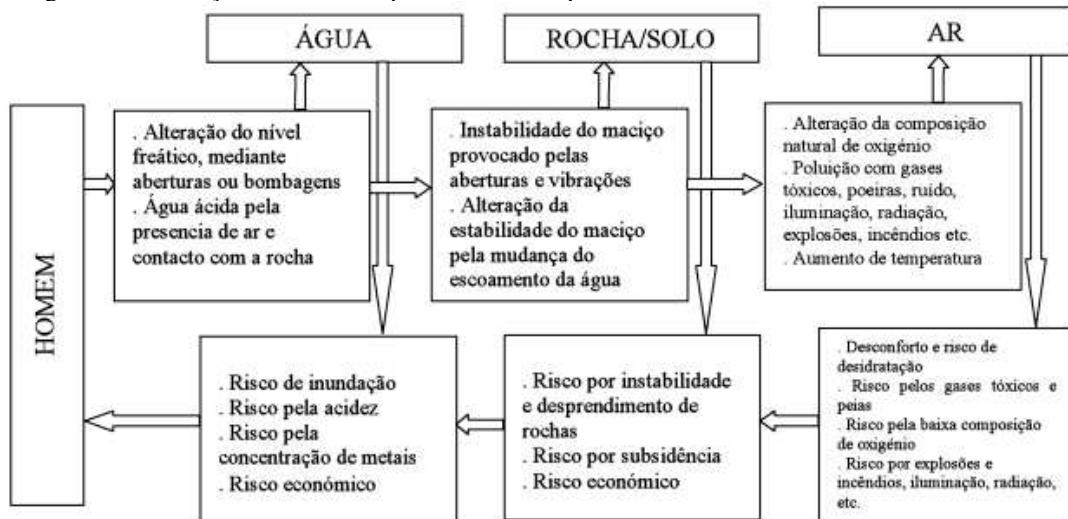
Figura 18 - Condições ambientais subterrâneas.



Fonte: (TORRES E DA GAMA, 2005).

Lisboa (2019) afirma que o sistema de ventilação em mina subterrânea proporciona condições ambientais adequadas ao trabalho em subsolo. O fluxo de ar em minas subterrâneas minimiza a temperatura ambiente (dentre outras causas, provocada pelo gradiente geotérmico), minimiza a poeira em suspensão existente no ambiente, controla os gases nocivos liberados pelos equipamentos de carregamento e transporte a óleo diesel e controla os gases explosivos emanados das detonações. Na mina é fornecida determinada quantidade de ar puro (*down cast*), a uma dada temperatura. Desse modo, será enviada a frentes de trabalhos onde irá retornar a superfície impura (*up cast*) contaminado com as impurezas contidas naquele ambiente subterrâneo como ilustrado na Figura 19.

Figura 19 - Interação entre os componentes físico-químicos e o homem no ambiente subterrâneo.



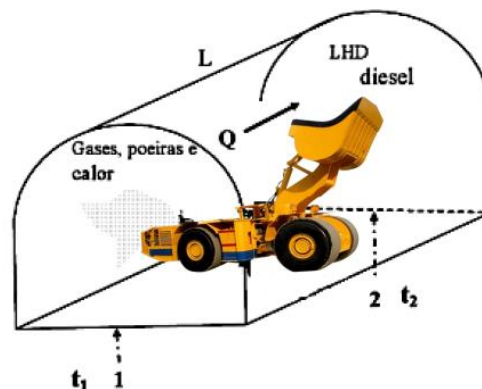
Fonte: (TORRES E DA GAMA, 2005).

A ventilação de mina é determinada em função, principalmente, da presença de gases nocivos provenientes dos motores a combustão, das detonações, do maciço, da oxidação, de madeira ou minério sulfetado. A eficácia da ventilação nesse papel depende de um fato simples:

uma vez que os gases nocivos são misturados com o ar, eles permanecerão uniformemente difundidos e nunca se separarão. Portanto, os gases problemáticos são diluídos, em sua fonte, em ar fresco (DE LA VERGNE, 2014). De acordo com Vutukuri e Lama (1986), o ar em mina é normalmente seco, contendo 20,93% de oxigênio (O_2), 79,04% de nitrogênio (N_2) e 0,03% de dióxido de carbônico (CO_2), em volume. Além destes gases, a atmosfera subterrânea contém pequenas quantidades de metano (CH_4), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), hidrocarbonetos não oxidados e parcialmente oxidados, amônia (NH_3), gás sulfídrico (H_2S) e dióxido de enxofre (SO_2), mesmo sob condições normais que juntos não correspondem a 0,1%.

A quantidade de ar necessária para melhorar a visibilidade e remover o pó de rocha gerado no subsolo. Hoje, os motores de carregadeiras tipo LHD em minas subterrâneas de rocha consistentes, são equipadas com lavadores de exaustão catalíticos para completar a combustão de gases problemáticos que é alcançado com uma eficiência de aproximadamente 90%. Os motores LHD também produzem partículas sólidas minúsculas (material particulado de diesel – DPM) devido à combustão incompleta e impurezas no combustível (Figura 20). Esta matéria consiste em carbono impregnado e uma variedade de compostos orgânicos, como parafina, aldeídos e compostos aromáticos polinucleares de hidrocarbonetos. Alguns desses compostos são cancerígenos reconhecidos. Infelizmente, o purificador catalítico não é eficiente em remoção desses particulados e, além disso, eles podem não permanecer uniformemente distribuídos no ar de exaustão da mina (DE LA VERGNE, 2014).

Figura 20 - Equipamento diesel em operação (LHD) e trecho elementar do ambiente subterrâneo.



Fonte: Adaptado Torres e da Gama (2005).

Hartman (1991) afirma que, a temperatura de uma mina é função do controle de temperatura e umidade, geralmente resfriamento ou aquecimento. Para reiterar, as funções abrangidas pelo ar-condicionado total são: controle de qualidade; controle de quantidade e

controle de temperatura e umidade da atmosfera. Para atingir esses objetivos, o condicionamento individual de processos é empregado na mineração, consistindo nos controles apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 - Segmentos de condicionamento individual.

11	Controle de qualidade (purificação do ar e remoção de contaminantes) uma.	Controle de gás - vapores e matéria gasosa, incluindo radiação
		Controle de poeira - material particulado
22	Controle de quantidade (regulando a magnitude e a direção do fluxo de ar)	Ventilação
		Ventilação auxiliar ou facial
		Exaustão local
33	Resfriamento, controle de temperatura e umidade (controle de calor latente e sensível)	Resfriamento
		Aquecimento
		Umidificação
		Desumidificação

Fonte: Adaptado Hartman (1991).

Os processos de controle podem ser aplicados individualmente ou em conjunto podendo servir a mais de uma função. Se o objetivo for o condicionamento total da mina, então todos os três objetivos devem ser atingidos, e vários processos podem ser aplicados simultaneamente. (Hartman, 1991).

2.5 Fontes naturais de calor

De acordo com Machado (2011) o calor ambiental em minas subterrâneas provém de uma variedade de fontes, divididas em dois grupos distintos: o primeiro inclui as fontes que dependem da profundidade das operações e do local geográfico da mina e, por conseguinte, do extrato rochoso; o segundo inclui as atividades humanas.

2.5.1 Autocompressão

Se não há troca de calor ou conteúdo de umidade no ar que circula, ocorre compressão dele. A temperatura se eleva, segundo a lei da compressão adiabática, durante a descida do ar

no interior da mina ocasionando a sua própria compressão, convertendo energia potencial em energia térmica (Hartman, 1991).

A ventilação funciona retirando as camadas de ar saturadas de vapor de água em contato imediato com a pele e repondo-as por outras não saturadas. Porém, em uma mina subterrânea, a capacidade de receber esse vapor de água, ou seja, de refrigerar o corpo humano, é função da entalpia do ar (Machado, 2011).

O mesmo autor relaciona as condições térmicas da superfície com as condições térmicas do subsolo visto que, segundo o autor, as condições térmicas na superfície afetam significativamente as condições térmicas no ambiente subterrâneo. Essa influência é tão mais acentuada quanto mais quentes forem as regiões onde as minas se situam. Portanto, as condições do ar na superfície influenciam a capacidade de refrigeração necessária.

2.5.2 Gradiente térmico

A importância desse fator geotérmico está relacionada com a possibilidade de estimar com precisão a temperatura do estrato rochoso em profundidade e, assim, inferir a taxa de calor liberado para o ar de ventilação. A taxa pela qual a energia térmica é transferida da rocha para o ar, além de outros fatores, é função da diferença de temperatura entre a superfície da rocha e a superfície da massa de ar (Hartman, 1991).

De acordo com Machado (2011) alega-se o rigor elevado na precisão das medidas porque a temperatura da rocha virgem em superfície é utilizada pelos aplicativos utilizados na modelagem de minas para inferir, nas simulações, as temperaturas do maciço em profundidade, sendo estas temperaturas utilizadas como um dos parâmetros para o cálculo da quantidade de calor liberado para o ambiente. Caso a temperatura esteja incorretamente inferida podem ocorrer desvios significativos na determinação da capacidade de refrigeração necessária para as operações em profundidade, podendo-se subestimar ou superestimar a capacidade real necessária de ventilação ou refrigeração, acarretando ônus técnico-econômicos de monta, assim como condições ambientais adversas para o trabalho humano.

2.5.3 Condutividade térmica e transferência de calor da rocha desmontada

De acordo com Valente (2005) quando dois corpos a temperatura diferentes são postos em contato, ocorre o equilíbrio térmico entre eles. Esse processo desenvolve-se

espontaneamente devido à transferência de energia do corpo de temperatura mais elevada para o corpo de menor temperatura.

Segundo Machado (2011) Em minas subterrâneas, esse efeito de resfriamento ocorre quando o material desmontado a temperaturas superiores, seja minério, seja estéril, é exposto ao ar de ventilação que circula em temperaturas inferiores. Portanto, há diferença de temperatura entre rocha e ar, e se desencadeia a transferência de calor. Esse fenômeno de transferência térmica pode ser equacionado segundo a Equação 1, que expressa a condutividade térmica.

$$Q = mC(\theta_1 - \theta_2) \quad (1)$$

Onde:

M é a massa de rocha desmontada em kg/s;

C é a calor específico da rocha em kJ/kg °C;

θ_1 é a temperatura da rocha desmontada imediatamente após o desmonte em °C;

θ_2 é a temperatura da rocha ao sair do fluxo de ar em °C.

Machado (2011) relaciona a temperatura θ_2 da Equação 1 da rocha desmontada ao grau de fragmentação, da superfície exposta à corrente de ar, da velocidade e das condições psicrométricas dessa corrente. A “condutividade térmica”, classificada como uma das propriedades de transporte de energia, fornece uma indicação da taxa segundo a qual a energia é transferida pelo processo de difusão.

O mesmo autor relaciona um ambiente de mina, a taxa pela qual a energia é transferida da rocha para o ar é função da diferença de temperatura entre a superfície da rocha e a massa de ar circulante, da rugosidade da superfície da escavação, da velocidade do ar, da porcentagem da superfície da rocha que está molhada, da pressão de vapor do ar de ventilação. A temperatura final da rocha é função do gradiente térmico, da difusividade da rocha e do tempo de exposição.

2.5.4 Calor específico

Machado (2011) define capacidade calorífica (C) de uma amostra de uma substância como a quantidade de energia térmica necessária para elevar de um grau Celsius a temperatura da amostra, sendo possível o cálculo através da Equação 2. A capacidade calorífica de um corpo

é proporcional a sua massa (m). Por isso, é conveniente definir a capacidade calorífica por unidade de massa de uma substância (c), neste caso, calor específico, medido em kJ/kg.

$$c = \frac{C}{m} \quad (2)$$

Para o autor a quantidade de energia térmica necessária para elevar a temperatura de uma massa de uma substância, de um incremento, varia de substância para substância. Para se determinar o calor específico de determinada rocha, testemunhos da rocha são triturados e peneirados para se obter uma porção fina, que se processa em um calorímetro de misturas. A incerteza calculada nas medições de calor específico é de aproximadamente 5%. O Quadro 3 sumariza, para comparação, o calor específico de determinadas rochas de ambientes geológicos no Brasil. A capacidade calorífica tem um papel preponderante no cômputo da capacidade de refrigeração necessária para uma mina. Assim, torna-se evidente, pelo Quadro 3, a necessidade de se determinar criteriosamente as capacidades caloríficas das rochas para dar entrada no aplicativo computacional; caso contrário, pode-se errar em larga escala a capacidade de refrigeração necessária para atender uma mina.

Quadro 3 - Calor específico de determinadas rochas brasileiras.

TIPO DE ROCHA	C (kJ/kg)
Metachert	860
Formação ferrífera bandeada (BIF)	860
X1 estéril	780
Clorita-biotita-xisto com pirrotita e arsenopirita	860
Halita	2160
Silvinita	2150
Carnalita	1634

Fonte: MACHADO (2011).

2.5.5 Condutividade e difusividade térmica

De acordo com Machado (2011) a condutividade térmica (λ) é definida como a taxa segundo a qual o calor flui através de certa área de um corpo. A definição precisa é dada pela equação de Fourier, Equação 3. Essa propriedade, classificada como uma das propriedades de

transporte de energia, fornece uma indicação da taxa de transferência de energia pelo processo de difusão. Pode ser entendida também como uma medida da propensão da rocha para conduzir calor. Quanto mais condutora for a rocha, maior será o valor da condutividade térmica, medida em watts por metro por grau (W/m°C, ou W/mK).

$$\frac{\Delta q}{\Delta t} = -\lambda A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3)$$

Onde:

Δq é a energia calorífica fluindo em kJ/kg; x é a distância, em m;

A é a área, em m²;

Δt é o tempo, em s;

$\Delta T/\Delta x$ é o gradiente de temperatura por unidade de distância, em °C/m;

λ é a condutividade térmica do material, em W/m°C ou W/m K.

Para Machado (2011) o método consistiu em cortar as amostras de rocha em cilindros com faces paralelas e polidas, e a condutividade das amostras foi determinada relativamente a discos de material de referência, cuja condutividade foi predeterminada através de calibração contra o material- padrão internacional, ou seja, o quartzo cristalino puro. A densidade é determinada pela relação da massa e volume desses discos, por meio da saturação prévia das amostras. A incerteza na determinação das densidades é estimada em menos que 0,5 %.

Quadro 4 - Condutividade térmica de algumas rochas brasileiras.

Tipo de rocha	λ (W/ m K)
Metachert	6,65
Formação ferrífera bandeada (BIF)	3,92
X1 Estéril	2,86
Clorita-biotita-xisto com pirrotita e arsenopirita	3,11
Halita	4,40
Silvinita	4,32

Fonte: MACHADO (2011).

De acordo com Machado (2011) a difusividade térmica (α) é relacionada com a taxa pela qual a rocha exposta resfria. Ela é a medida da capacidade da rocha em conduzir a energia térmica, relacionada com a sua capacidade de armazená-la. Rochas com valores elevados de difusividade térmica mudarão rapidamente suas condições térmicas, enquanto materiais com

valores reduzidos de difusividade térmica responderão mais lentamente, levando mais tempo para atingir sua nova condição de equilíbrio. A difusividade térmica, α , é expressa pela Equação 4.

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (4)$$

Onde:

λ é a condutividade térmica, em $\text{m}^2/\text{s} \times 10^{-6}$;

c é o calor específico, em $\text{J}/\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}$;

ρ é a densidade da rocha, em kg/m^3 .

Para o mesmo autor as difusividades individuais são obtidas através do cálculo utilizando-se dos parâmetros previamente obtidos. O Quadro 5 apresenta valores de difusividade para os principais tipos de rochas brasileiras.

Quadro 5 - Difusividade térmica de algumas rochas brasileiras.

Tipo de rocha	α ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)
Metachert	2,88
Formação Ferrífera Bandeada (BIF)	1,61
X1 Estéril	1,81
Clorita-biotita-xisto com pirrotita e arsenopirita.	1,31

Fonte: MACHADO (2011).

2.6 Fontes artificiais de calor

Para Machado (2011) os veículos em operação no subsolo, os transformadores nas subestações elétricas, os diversos ventiladores usados para movimentar o ar, além dos efeitos desejados, transformam em maior ou menor parte sua energia em calor. Pode-se dividir o calor dos maquinários para a atmosfera subterrânea na forma de calor sensível, calor latente ou uma combinação das duas. Se a fonte de calor não envolver a evaporação nem a condensação de água e não houver a formação química ou absorção do vapor de água, então a transferência de calor consiste inteiramente de calor sensível.

2.6.1 Calor sensível

Tipicamente em subsolo, os equipamentos elétricos, normalmente os ventiladores, são a fonte predominante de calor sensível. A adição ou a subtração do calor sensível causa a mudança, seja sobre a temperatura de bulbo úmido, seja a temperatura de bulbo seco. Isso pode ser expresso segundo a Equação 5, que expressa o estado da conservação da energia (MCPHERSON, 2008).

$$\Delta H = \frac{q + W}{M} - \frac{\Delta V^2}{2} + g\Delta Z \quad (5)$$

Onde:

Z é a elevação, em m;

H é a entalpia do fluido, em kJ/kg;

q é a taxa de transferência de calor dentro do volume de controle, em kW; W é o trabalho no fluido, em kW;

M é a massa do fluido, em kg;

V é a velocidade do fluido, em m/s;

g é a aceleração da gravidade, em m/s².

2.6.2 Calor latente

De acordo com Machado (2011), o calor latente é adicionado quando energia calorífica é usada para excitar as moléculas de água e aumentar suficientemente a energia cinética, de modo que as moléculas deixem a superfície do líquido e se transformem em vapor de água. Sabe-se que, quanto mais seco é o ar, maior é a evaporação de água e, conseqüentemente do suor. Então, a alta umidade relativa do ar pode acarretar sérios problemas de desconforto para os trabalhadores que operam em ambientes quentes e de atmosfera úmida.

Para o autor a água é o sistema de controle por excelência no controle da poeira ambiental. É largamente utilizada nas operações subterrâneas, nas atividades de perfuração e desmonte, no umedecimento das pilhas de material estéril ou minério desmontado, no umedecimento das pistas de rolamento para evitar a formação de poeiras ou água oriunda do extrato rochoso. Em minas profundas e quentes, controles especiais devem ser adotados para manter baixa a umidade relativa. Usualmente usa-se a extração imediata da água industrial

utilizada através do bombeamento e, em casos especiais tais como minas muito profundas e quentes, utilização de água gelada para perfuração e umedecimento do material desmontado.

2.6.3 Calor proveniente do óleo diesel

O óleo diesel é um combustível derivado do petróleo e constituído basicamente por hidrocarbonetos. É um composto formado principalmente por átomos de carbono, hidrogênio e, em baixas concentrações, por enxofre, nitrogênio e oxigênio e selecionados de acordo com as características de ignição e de escoamento adequadas ao funcionamento dos motores diesel. É um produto inflamável, medianamente tóxico, volátil, límpido, isento de material em suspensão e com odor forte e característico. A densidade do óleo diesel brasileiro a 20 °C (em kg/m³) e massa específica em relação à água (em kg/m³) e a 4 °C é estipulada em limites especificados pela Agência Nacional de Petróleo (ANP) são: 0,820 a 0,880 kg/m³ para diesel “B” (interiorano) e 0,820 a 0,865 kg/m³ para diesel “D” (metropolitano), e o diesel marítimo 0,82 - 0,88 a 20 °C; pelo método NBR-7148 (PETROBRAS, 2010).

O quadro 6 mostra que, quando o combustível é queimado no interior do motor de combustão interna diesel, uma porção de energia do combustível é utilizada para produzir vapor de água e parte da energia química contida no combustível é liberada em forma de calor ou trabalho útil. Constata-se, então, que o processo de combustão do óleo diesel produz tanto calor sensível quanto calor latente (Machado, 2011).

Quadro 6 - Produtos da combustão incompleta do diesel.

Componente	Porcentagem (em volume)
Hidrocarbonetos	< 1
Monóxido de carbono	< 1
Óxidos nítricos	< 1
Dióxido de nitrogênio	< 1
Carbono	< 1
Nitrogênio	73
Dióxido de carbono e oxigênio	13
Água	13
Total	100

Fonte: MACHADO (2011).

Sabe-se também que os equipamentos não trabalham a plena carga, todo o tempo. Para modelar com precisão a quantidade de calor gerado por máquinas acionadas a diesel, é essencial usar a taxa de utilização desses equipamentos, preferencialmente através da medição de seu

ciclo operacional, em uma média mensal. Pode-se também estimar a carga térmica com mais precisão, quando se sabe o consumo de diesel, multiplicado por sua capacidade calorífica (MCPHERSON, 2008).

De acordo com Machado (2011), essas cargas caloríficas podem ser localizadas ou distribuídas. Quando o equipamento trabalha em uma frente única ou, a maior parte do seu tempo, é possível modelar a carga térmica concentrada naquela frente de serviço. Se o equipamento for deslocado por grandes distâncias, caso típico dos caminhões, ou permanecer por curtos períodos em uma única frente, a carga térmica deve ser distribuída ao longo de sua trajetória e modelada como uma carga distribuída.

2.7 Efeitos do calor no organismo humano

Segundo Machado (2011), em minas profundas a geração de calor torna-se o fator predominante das condições ambientais reinantes, e é necessária a introdução de refrigeração para manter o ambiente em condições adequadas de trabalho.

Os efeitos principais da profundidade, de uma perspectiva de ventilação, são o aumento do calor e da umidade, que leva as pessoas a concentrar sua atenção e a se tornar menos conscientes dos sinais visuais. Estudos demonstraram que essas reduções levam eventualmente a um ponto em que o déficit de atenção é tal que compromete a segurança e a saúde ocupacional, contribuindo para o aumento do potencial para fatalidades (PAYNE; MITRA, 2008).

Segundo a literatura médica básica, o organismo humano possui um centro termorregulador, localizado no hipotálamo, que é sensível às variações de temperatura do ambiente e responsável por uma série de alterações fisiológicas cuja finalidade é manter constante a temperatura do corpo. Quando o organismo se sujeita a uma sobrecarga térmica, ocorrem várias reações de adaptação tais como vasodilatação periférica, que aumenta a circulação sanguínea na superfície do corpo, facilita a troca de calor com o ambiente, acelera a atividade das glândulas sudoríparas e provoca a síncope por calor, que se manifesta com tontura ou desmaio em pessoas expostas ao ambiente quente (SOUZA; LIMA, 2020).

O anexo nº 3 da Norma Regulamentadora 15 da Portaria 3.214/78 estabelece que a exposição ao calor deve ser avaliada através do “Índice de bulbo úmido - termômetro de globo” (IBUTG) definido pela Equação 6 para ambientes internos ou externos sem carga solar:

$$IBUTG = 0.7t_{bn} + 0.3t_g^{\circ}C \quad (6)$$

Onde:

tbn é a temperatura de bulbo úmido natural em °C;

tg é a temperatura de globo °C;

tbs é a temperatura de bulbo seco °C.

No caso da umidade relativa, é importante evitar o ar muito úmido ou seco, pois pode afetar o conforto térmico, já em relação ao frio e ao calor, quando intensos, podem gerar desconforto e provocar sobrecarga energética no corpo. Dessa maneira, é sempre bom manter as condições de iluminação, conforto térmico, bem como a proteção contra outros fatores de risco químico e físico, de acordo com o previsto na Norma Regulamentadora 17 que trata das diretrizes de ergonomia no trabalho para garantir saúde, segurança e conforto aos trabalhadores, além de, outras normas regulamentadoras (Franceschi, 2013).

De acordo com a NR-15 que trata sobre atividades e operações insalubres, a legislação brasileira instituiu os limites de tolerância para exposição ao calor, em regime de trabalho intermitente e de descanso no próprio local de prestação de serviços, conforme a seguir.

Quadro 7 - Valores de IBUTG expressos em °C.

Regime de trabalho intermitente com descanso no próprio local de trabalho	Tipo de atividade		
	Leve	Moderada	Pesada
Trabalho contínuo	Até 30,0	Até 26,7	Ate 25,0
45 minutos trabalho x 15 minutos de descanso	30,1 a 30,6	26,8 a 28,0	25,1 a 25,9
30 minutos trabalho x 30 minutos de descanso	30,7 a 31,4	28,1 a 29,4	26,0 a 27,9
15 minutos trabalho x 45 minutos de descanso	31,5 a 32,2	29,5 a 31,1	28,0 a 30,0
Não é permitido o trabalho sem a adoção de medidas adequadas de controle	> 32,2	> 31,1	>30

Fonte: NR 15

Além dos aspectos legais e regulamentares que devem ser levados em consideração, a exposição do homem a condições térmicas desfavoráveis conduz inevitavelmente ao aumento da temperatura do organismo e, conseqüentemente, a efeitos fisiológicos que reduzem seu desempenho no trabalho (Machado, 2011).

2.8 Determinação do volume de ar devido a fontes poluidoras

Karoly (2009) reconhece o fato que o uso de equipamentos a diesel em subsolo permitiu uma melhoria considerável na produtividade, nos últimos 30 a 50 anos. Relata também que isso acontece porque o óleo diesel é uma fonte econômica de energia, que as máquinas são robustas e versáteis

O material particulado diesel inclui a fuligem de diesel e aerossóis sólidos. A maioria das partículas diesel está na faixa menor que 1.0 micrômetros e 10 μm , em tamanho. As partículas de fuligem têm um núcleo sólido que consiste principalmente de carbono elementar (CE), com uma ampla variedade de outras substâncias agregadas à sua superfície. Exposição a altas concentrações de material particulado diesel podem resultar em uma variedade de efeitos adversos à saúde (EPA, 2002).

Segundo Machado (2011), uma tarefa crítica para o planejamento da ventilação é determinar a quantidade de ar necessária para diluir a concentração de partículas diesel, em níveis considerados inofensivos pela literatura técnica, quando uma dada frota em particular estiver em operação.

Reconhecendo esses riscos, a Administração da Segurança e Saúde nas Minas dos Estados Unidos (MSHA) reduziu drasticamente o limite de exposição ocupacional permissíveis nas minas subterrâneas dos EUA. Os novos regulamentos estabelecem que a exposição pessoal dos trabalhadores nas minas ao particulado diesel para um turno de oito horas de trabalho não deve exceder a concentração no ar equivalente a 160 microgramas de carbono total por metro cúbico de ar (MSHA, 2008).

Dimensiona-se a vazão de ar mínima necessária para diluir a emissão diesel, para o limite de tolerância adotado pela Instituto Nacional de Segurança e Saúde Ocupacional (NIOSH), 0.1 mg/m^3 , utilizando-se esta equação:

$$Q_{dp(\text{mina})} = \frac{\sum EC_{kw}}{DP_{LT}} * \sum P_{kw} \quad (7)$$

Onde:

$Q_{DP(\text{min})}$ é a vazão mínima de ar requerida no ponto, em m^3/s ;

$DP_{LT} = 0.1$ ou o Limite de Tolerância para o carbono elementar, em mg/m^3 ;

$\sum EC_{kw}$ é o somatório de material particulado, em cada segundo, emitido pela frota diesel analisada, em mg/s ;

$\sum P_w$ é o somatório da potência diesel em kW.

Segundo Machado (2011), com esses dados é possível obter a taxa de emissão de material particulado diesel para cada veículo, o que permite calcular a vazão de ar necessária para reduzir as concentrações de particulados a níveis aceitáveis através do projeto do sistema de ventilação da mina.

2.8.1 Concentração máxima de poeira mineral

De acordo com Dias *et al.* (2017), em operações que envolvem atividades como polir, esmerilhar, serrar, cortar, perfurar, jatear, triturar, esmagar e pulverizar, a produção de poeira é mais intensa, assim como nos processos nos quais há movimentação de material particulado fino, que contenha sílica, como por exemplo nas operações de transvasar, embalar, despejar, peneirar, limpar, entre outras representam sérios riscos à saúde dos trabalhadores quando se apresentam em concentrações elevadas, em ambientes sem controle, porque acarretam o surgimento de doenças respiratórias.

A sílica (SiO_2) é um composto natural formado pelos elementos químicos oxigênio e silício, encontrado na maioria das rochas, constituindo cerca de 60% da crosta terrestre. Há, portanto, uma vasta possibilidade de utilização de materiais contendo sílica em ambientes ocupacionais, o que explica a larga distribuição global da Silicose e outras doenças relacionadas à exposição., visto que, o silício é o elemento mais abundante na superfície da Terra constituindo- se em 97,6% da crosta terrestre (Dias *et al.* 2017).






Dias *et al.* (2017) ainda relaciona a ocorrência das três formas de sílica livre: cristalina, representadas pelo quartzo; cristobalita e tridimita. O quartzo é o mais comum, que possui diferentes potenciais tóxicos, e que podem ser convertidos de uma forma à outra, sob condições especiais de temperatura, como por exemplo, em situações industriais. Denomina-se silicato quando a silício se combina a metais. Existem três classes de substâncias que contêm silício onde podem ser classificadas como ligas e silicatos, compostos inorgânicos com óxido (SiO_2) e com silicatos, como se encontra no asbesto, no cimento, na mica, entre outras, e compostos inorgânicos, tais como os ésteres de silício.

De acordo com Machado (2011) a maior preocupação relaciona-se com aquela em forma de dióxido. O dióxido de silício pode existir em duas variedades: amorfa e cristalina. A sílica amorfa, na forma diatomácea, aparentemente oferece baixo risco à saúde e na forma cristalina e livre de combinações oferece alto risco.

Para fazer mal à saúde humana, a sílica livre deve estar presente na fração respirável da poeira inalada. A fração respirável das poeiras cujo tamanho ou diâmetro é menor que 10 micrômetros podem ser descritas como aquelas porções que conseguem penetrar nas áreas mais profundas dos pulmões, alcançando os alvéolos pulmonares. As partículas de sílica que atingem o interior dos pulmões e conseguem ultrapassar as paredes dos alvéolos (Dias *et al.* 2017).

Segundo Machado (2011), essas partículas provocam uma reação dos tecidos de caráter inicialmente inflamatório, que posteriormente se cicatrizam. As partículas são absorvidas, e o mesmo processo cicatricial se repete, provocando o endurecimento do tecido pulmonar. Por isso, os pulmões perdem sua elasticidade, e o indivíduo silicótico precisa fazer um esforço cada vez maior para que o ar chegue ao seu interior. Anormalidades observadas ao exame do parênquima pulmonar classificadas em pequenas e grandes opacidades. Dias *et al.* (2017) relaciona as pequenas opacidades a profusão, as zonas pulmonares afetadas, a forma (regular ou irregular) e o tamanho de acordo com a Figura 21, a profusão ou quantidade de lesões podem ser classificadas em quatro categorias principais: 0, 1, 2 e 3. Cada uma delas é formada por 3 subcategorias de (0/-; 0/0; 0/1; 1/0; 1/1; 1/2; 2/1; 2/2; 2/3; 3/2; 3/3; 3/+) indicando a magnitude das lesões nos alvéolos pulmonares.

Figura 21 - Profusão ou quantidade de lesões no pulmão devido a poeira mineral

0		0/- 0/0
0		0/1
1		1/0 1/1 1/2
2		2/1 2/2 2/3
3		3/2 3/3 3/+

Fonte: (Dias et al., 2017).

De início, o trabalhador exposto às partículas de sílica pode nada sentir, mas com o passar dos anos vai apresentando câibras, cansaço nos esforços, certo “aperto na caixa torácica”, dificuldades na inspiração até a falta de ar propriamente dita. A silicose é incurável e

progressiva, embora essa progressão seja, em geral, lenta. Note-se, também que além destas características, deve haver certa exposição à poeira contendo sílica livre, a uma determinada concentração e que

a suscetibilidade individual tem um papel no desenvolvimento da doença (NISA, 2010).

O anexo 12 da NR-15 estabelece fórmulas para determinação do limite de tolerância para poeira com sílica livre cristalizada (quartzo), de acordo com o método de amostragem e análise laboratorial. O limite de tolerância para poeira respirável, segundo a norma é expresso em mg/m^3 , dado pela Equação 8.

$$LT = \frac{8}{\%quartzo + 2} \quad (8)$$

Machado (2011) estabelece que tanto a concentração quanto a porcentagem de quartzo deve ser determinado a partir da porção que passa por um seletor de partículas, tipo ciclone, além disso, para as características de seleção de partículas segundo a NR-15, anexo 12, da Portaria n.º 3214, de 1978. O limite de tolerância para poeira total (respirável e não respirável), expresso em mg/m^3 , é dado pela Equação 9.

$$LT = \frac{24}{\%quartzo + 3} \quad (9)$$

O anexo 12 da NR-15 reforça sobre o intervalo de tempo relacionado a jornadas de trabalho de até 48 horas semanais, inclusive. Para jornadas de trabalho que excedam a 48 horas semanais, os limites deverão ser reduzidos e fixados pela autoridade competente. Já as porcentagens de quartzo nas amostras são caracterizadas através de determinação por difratômetro de raios X, elaborada por laboratórios credenciados pelas autoridades governamentais.

2.8.2 Concentração máxima de gases

Conhecendo-se a fonte de gases e sua vazão, é possível determinar a vazão de ar fresco necessária para atingir as concentrações de gases até as proporções exigidas pela legislação, através da Equação 10 (Hartman, 1991).

$$Q = \frac{Q1(1 - LT)}{LT - N} \quad (10)$$

Onde:

Q é a vazão necessária de ar de diluição dada em m³/s;

Q1 é a vazão de geração do gás em m³/s;

LT é o limite de tolerância dado em %;

N é a concentração do gás no ar normal de mina, em %.

O Quadro 8 mostra os limites de tolerância dos principais gases encontrados em minas subterrâneas metalíferas, conforme estabelecido na NR-15.

Quadro 8 - Limites de tolerância para os gases mais comuns.

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

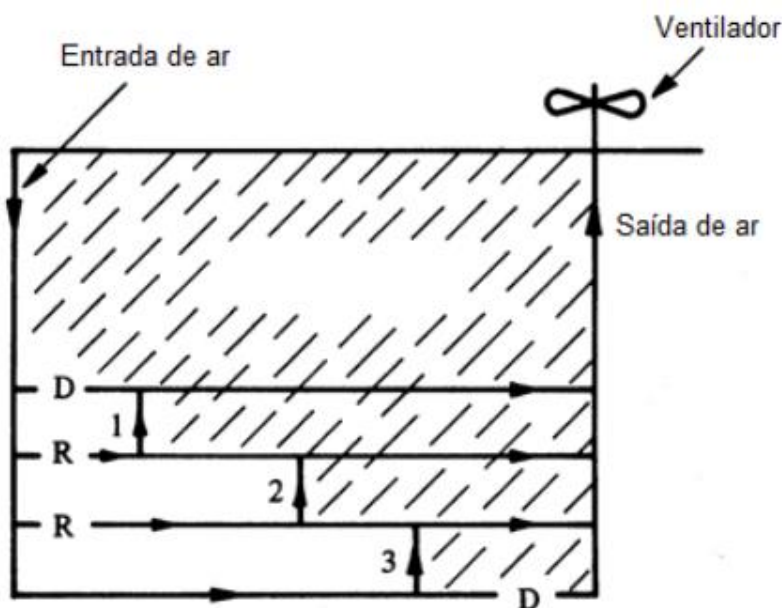
Fonte: NR-15

2.9 Sistema de ventilação

A mais vital das operações auxiliares na mineração subterrânea é a ventilação. Esta mantém, em grande parte, a qualidade e a quantidade do ambiente atmosférico e é o esteio do sistema de suporte de vida do mineiro e da mina (HARTMAN; MUTMANSKY, 2002). Torres e da Gama (2005) relacionam a caracterização da atmosfera em minas subterrâneas a aspectos como: dimensões geométricas, características físicas, circuitos de ar (mapa adequado) indicando-se entradas e saídas principais, sentido do ar, velocidade e caudal de ar, ventiladores, portas e cortinas de ventilação, temperaturas e humidade relativa, pressão barométrica, coeficiente de fricção, comprimento equivalente, concentração de poeiras, gases tóxicos e explosivos, ruído, radiação, iluminação, homens e máquinas com motor diesel. É importante determinar as tendências de parâmetros térmicos, dinâmicos, volumétricos, poeiras, gases, ruído, radiação, entre outros, e considerar também referências de custos. De acordo com Vutukuri e Lama (1986) e Lisboa (2019), o ar fresco geralmente ingressa na mina por meio de vias de acesso como

shafts, rampas, galerias de transporte e frentes de desmonte, ou ainda por poços de produção, conforme rotas normais de circulação. Já o retorno do ar impuro ocorre por caminhos previamente projetados, como galerias especializadas, chaminés de ventilação escavadas para esse fim específico ou poços dedicados, garantindo um fluxo eficiente e seguro, conforme ilustrado na Figura 22.

Figura 22 - Esquema de um sistema básico de ventilação de mina.

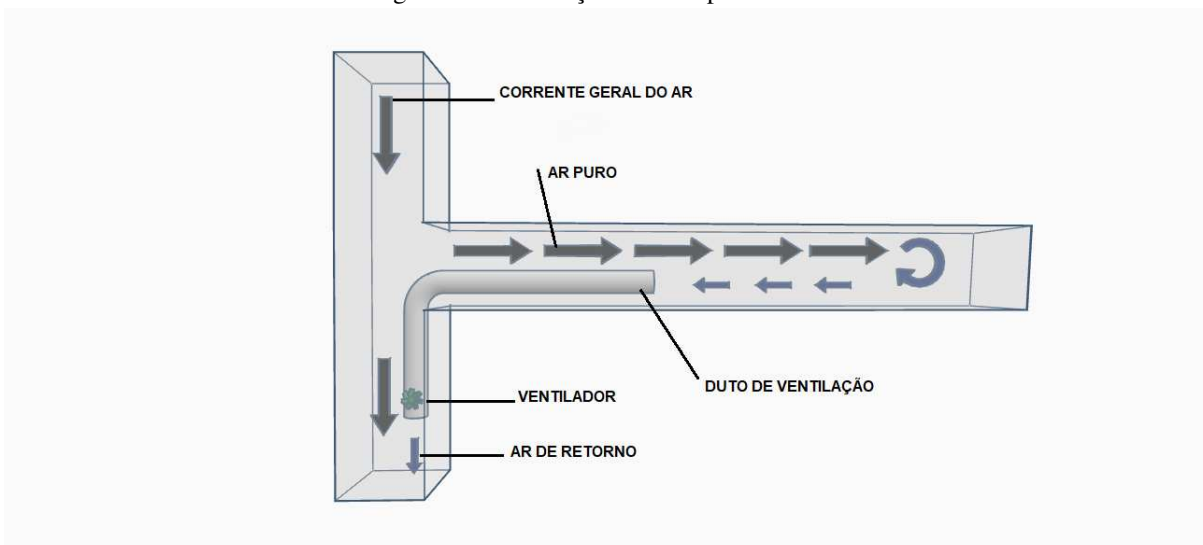


Fonte: Adaptado (VUTUKURI e LAMA, 1986).

Para encaminhar o ar impuro até a superfície e renovar a ventilação nessas frentes de trabalhos, são alocados, nos poços e galerias de retorno do ar (*upcast*), ventiladores funcionando como exaustores puxando o ar viciado para fora. Em mina subterrânea, técnicas específicas de ventilação mecânica são adotadas para renovação de ar de galerias. Nesse sentido, segundo Costa (2005), a ventilação pode ser feita de diversas formas, por exemplo: exaustão, insuflamento e misto.

A exaustão consiste na retirada do ar das frentes de trabalho por meio de ventiladores instalados na entrada da mina (galeria de acesso) com conexões até o interior das galerias de desenvolvimento e operações. Geralmente essa ventilação necessita de estruturas para direcionar o fluxo de ar nesses ambientes, como: lonas estruturadas, chapa soldada ou madeira. Costa (2017) afirma que o ar da galeria de desenvolvimento é aspirado através de um duto de ventilação e, automaticamente, é substituído pelo ar puro proveniente da galeria. Do mesmo modo, para evitar a recirculação, a descarga do ar de retorno deverá ser feita ao menos cinco metros da entrada do desenvolvimento, conforme mostra a Figura 23.

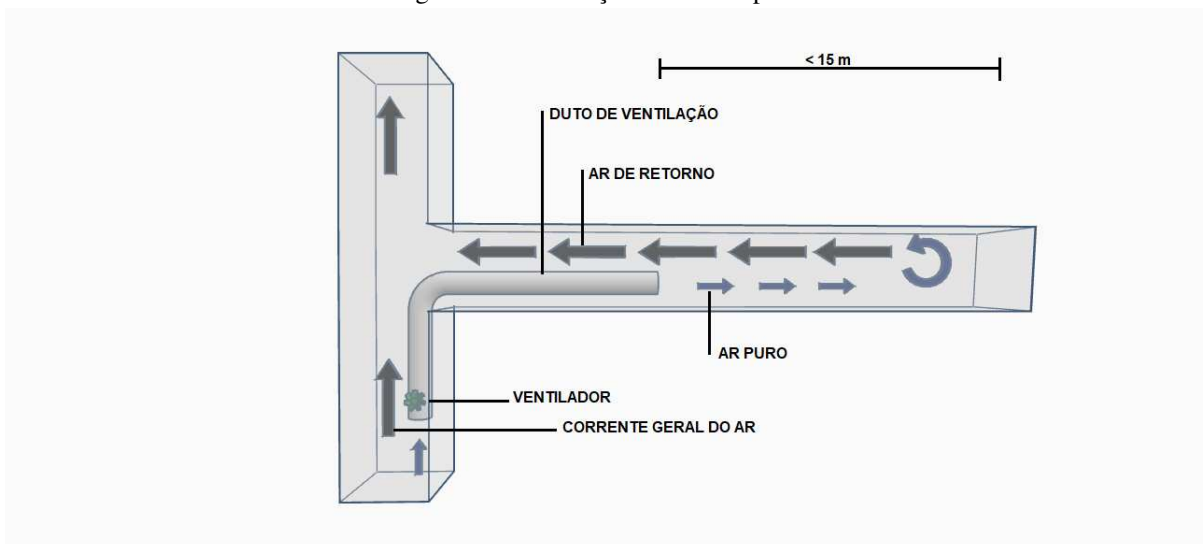
Figura 23 - Ventilação auxiliar por exaustão.



Fonte: ADAPTADO VUTUKURI E LAMA (1986).

Consoante Costa (2005), a ventilação por meio do insuflamento (soprante) leva o ar até as frentes de trabalho por meio de ventiladores colocados na entrada da galeria e ligados ao seu interior por condutos de insuflamentos, feitos com os mesmos materiais que os de exaustão, como ilustrado na Figura 24. Essa solução, a par da vantagem de insuflar ar puro diretamente na frente de trabalho, apresenta o inconveniente de efetuar a saída de ar da ventilação pela galeria de acesso, trazendo poeira e fumaças que prejudicam o tráfego através dela.

Figura 24 - Ventilação auxiliar soprante.

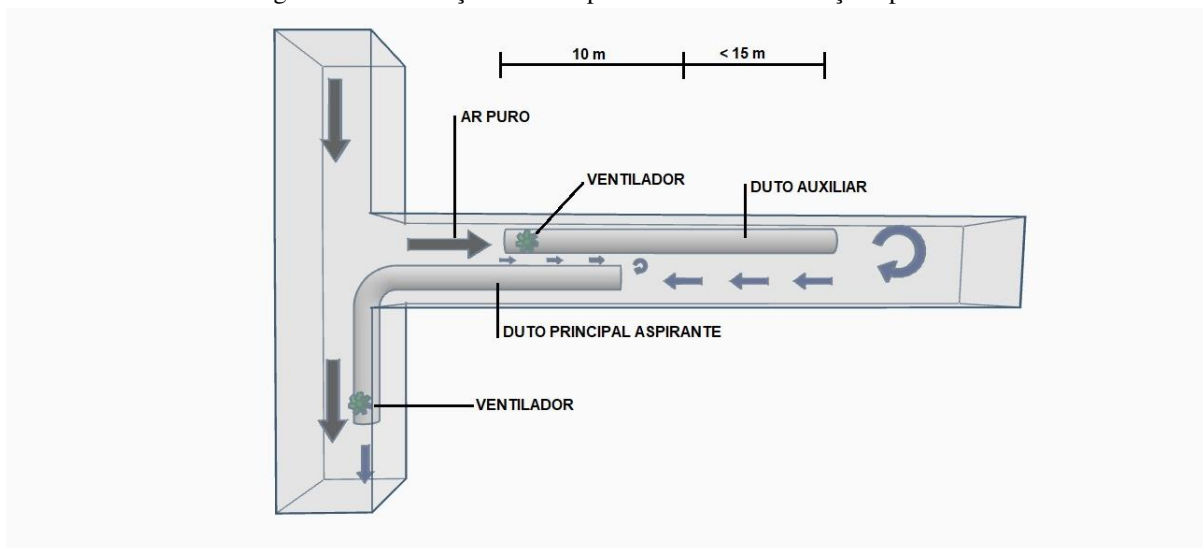


Fonte: (VUTUKURI e LAMA, 1986).

De acordo com Albuquerque Costa (2017) no sistema de ventilação misto se sobrepõe um duto auxiliar de insuflamento ao sistema de exaustão, consistindo em reunir os dois

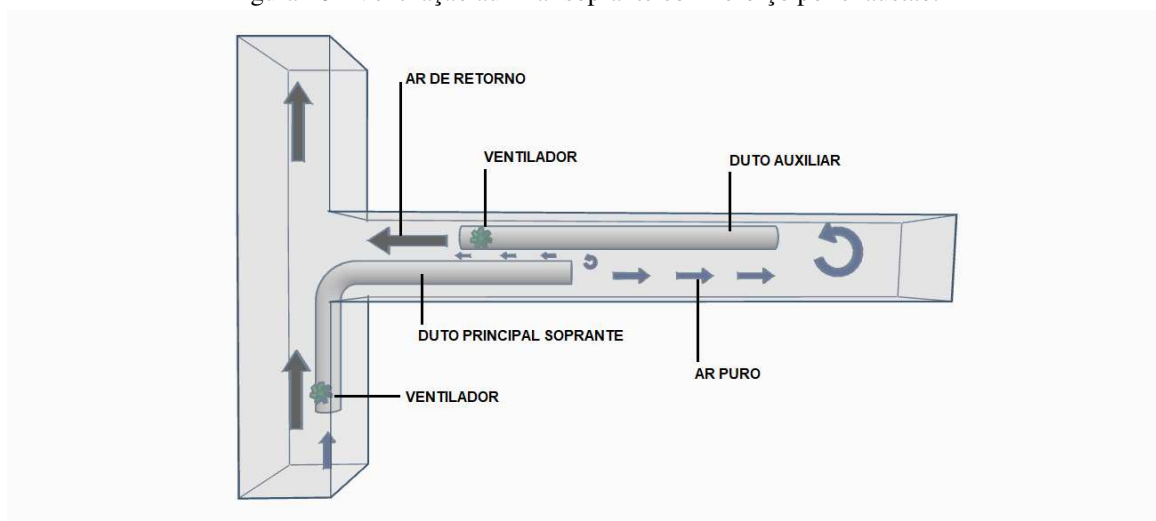
processos anteriores, como ilustrado nas Figuras 25 e 26. Costa (2005) afirma que, é feita a exaustão após as detonações de explosivos e demolição intensa, e insuflamento nas horas de trabalho normal, durante as quais não se verificam formações de poeira e fumaça em excesso.

Figura 25 - Ventilação auxiliar por exaustão com reforço soprante.



Fonte: (VUTUKURI e LAMA, 1986).

Figura 26 - Ventilação auxiliar soprante com reforço por exaustão.



Fonte: (VUTUKURI e LAMA, 1986).

Germany (2002) diz que a ventilação de minas é uma área de grande deficiência de conhecimentos e de pessoal local especializado no Brasil. Com exceção de poucas empresas, que dispõe de alguns especialistas bem formados, esta é uma das áreas de grandes oportunidades de melhoria, em se tratando do suporte técnico necessário para a mineração

subterrânea. É preciso recorrer a especialistas estrangeiros para trabalhos dos mais elementares. Dessas carências resulta que as temperaturas de fundo de nossas minas são mais elevadas.

2.9.1 Aspectos regulamentares

A norma regulamentadora 22 da portaria n.º 2037, de 15 de dezembro de 1999, explicita no parágrafo 22.24 – ventilação em atividade de subsolo e define os critérios para calcular o fluxo total de ar fresco nas minas subterrâneas. Essa norma fomenta princípios fundamentais para o cálculo de vazão de ar fresco nos sistemas de ventilação das minas subterrâneas em função dos aspectos locais.

Com base nessas exigências legais, deve-se utilizar diversos critérios para se calcular as demandas mínimas do fluxo de ar nas escavações de minas subterrâneas, em que deve prevalecer a maior vazão. Os parâmetros regulamentares estabelecidos para determinação do fluxo ar são:

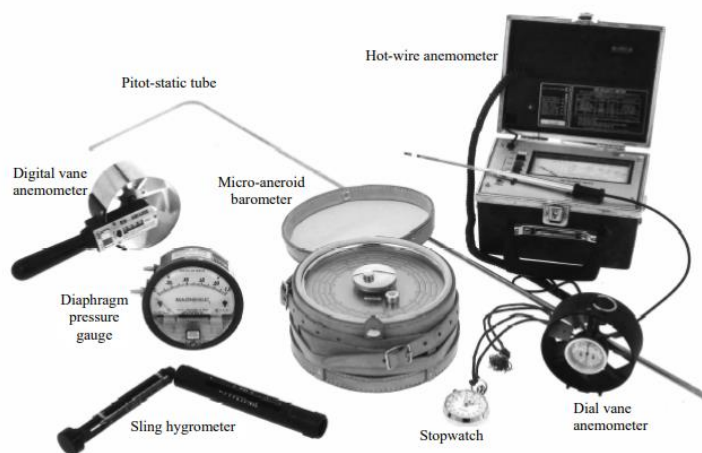
- Número máximo de pessoas em subsolo;
- Consumo de explosivos;
- Veículos e equipamentos a óleo diesel;
- Tonelagem mensal desmontada;
- Velocidade mínima do ar;
- Vazão de ar por metro quadrado da área da frente em desenvolvimento.

A legislação estabelece que todas as frentes de lavra devem ser ventiladas por ar fresco proveniente da corrente principal ou secundária. Não é permitida, por exemplo, a reutilização do ar de ventilação para uma nova frente de serviço, uma vez que este tenha sido utilizado previamente, ou seja, não é permitido o uso de ventilação em série. A velocidade do fluxo de ar é uma grandeza medida através de equipamentos eletrônicos e serve para se monitorar a quantidade de fluxo de ar que trafega através de determinada seção da galeria, para que posteriormente seja utilizada para controle deste fluxo.

2.9.2 Equipamentos eletrônicos aplicado ao monitoramento do fluxo de ar em minas subterrâneas

Os equipamentos eletrônicos utilizados para o monitoramento do fluxo de ar são denominados anemômetros, que consistem em dispositivos usados para a medição de fluxo de ar em locais de ambiente aberto ou confinado. Os dispositivos de anemometria e medição de demais parâmetros (Figura 27), servem para diversas aplicações como: centrais climatológicas e meteorológicas, estudo de viabilização de locais para a instalação de parques eólicos, medição de fluxo de ar em galerias subterrâneas, dentre outros. Nesse sentido, existem vários modelos de anemômetros indicados para cada situação, como no caso da medição de parques eólicos, na qual, são indicados dois anemômetros de concha posicionados na parte frontal do parque e em sentido da direção dos ventos; assim, é possível garantir a representatividade e assegurar com que não possuam obstáculos que impeçam ou interfiram na medição dos dispositivos (SAMPAIO *et al.* 2006).

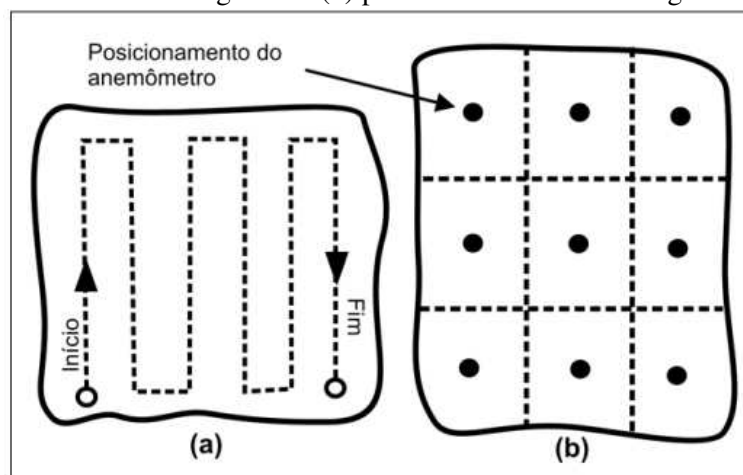
Figura 27 - Instrumentos de medição em ventilação de mina subterrânea.



Fonte: (MCPHERSON, 2008).

Como explanado por Pinto (2006) é necessário um sistema de ventilação artificial que atenda as especificações necessárias com base nos limites permitidos de fluxo de ar. Para isso, é utilizado o anemômetro para que seja possível fazer o correto condicionamento do ambiente de trabalho e dimensionar as quantidades e limites toleráveis para as correntes de ar. Os anemômetros mais utilizados, nas medidas em subsolo, são os anemômetros de pás que podem ser de dois tipos: integrador e não integrador ilustrado na Figura 28.

Figura 28 - Determinação do perfil de velocidades
(a) para anemômetro integrador e (b) para anemômetro não integrador.



Fonte: Adaptado Hartman (1991).

Os anemômetros integradores percorrem a seção da galeria, no qual, o tempo de medida não seja inferior a 2 minutos. Esse procedimento evita que o movimento do operador interfira nos valores de velocidades medidos. Se a mina dispõe de um anemômetro não integrador, o método de medida recomendado é a divisão da seção da galeria em retângulos imaginários de mesma área. Nesse caso, a velocidade do ar na seção é a média aritmética dos valores de velocidade medidos. Na seleção de um anemômetro, deve-se optar, preferencialmente, por anemômetros de pás por gerarem valores adequados de velocidade do ar (Pinto, 2006).

De acordo com Albuquerque Costa (2017), o termo automação diz respeito ao controle automático dos equipamentos, onde as ações deixam de depender da intervenção humana. Para a implantação da automação, são utilizados diversos dispositivos, sendo o CLP (Controle Lógico Programável), o mais difundido entre eles. Segundo a NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*) o CLP é um aparelho digital que consta de uma memória interna programável capaz de armazenar instruções para implementações específicas, tais como, lógica, sequenciamento, temporização, contagem e aritmética, para controlar por meio de módulos de entrada e saída vários tipos de máquinas e processos, assim, facilitando o monitoramento e automação do fluxo de ar em galerias de minas subterrâneas para um bom funcionamento do ambiente.

2.10 Condições adversas

O ar de ventilação incorpora gases, vapores, poeira e umidade resultantes das diversas atividades executadas. E, por ser um fluido compressível, sofre modificações significativas em

sua densidade. Essa variação na sua composição química, na sua densidade e na sua temperatura demanda metodologias e ferramentas adequadas de controle das condições reinantes e são essenciais para se calcular as demandas futuras, à medida que a mina se aprofunda (Machado, 2011).

Segundo o autor o aumento da mecanização das minas oriunda dos modernos métodos de mineração subterrânea, além do calor gerado, introduziu enormes volumes de gases. Uma tarefa crítica para a equipe responsável pelo planejamento de ventilação é determinar a quantidade de ar exigida para baixar a concentração de material particulado diesel até os limites permitidos, quando uma dada frota de equipamentos estiver em operação. Proporcionar um projeto adequado do sistema de ventilação da mina, que leve em consideração os equipamentos com as menores taxas de emissão, é a estratégia mais eficaz para reduzir essas concentrações. Porém, na maioria dos casos, não é possível trocar a frota existente por outra menos poluente devido aos altos custos envolvidos.

O uso generalizado de óleo diesel nas minas subterrâneas determina que os principais aplicativos usados no dimensionamento de circuitos de ventilação incorporem algoritmos seja para os cálculos de calor latente e calor sensível, seja para a simulação dos caminhos de ventilação as concentrações de material particulado diesel, poeira ou gases de maneira a manter os limites de tolerância legais. Isso torna possível também antecipar condições de emergências e, conseqüentemente, providenciar medidas mitigadoras (Machado, 2011).

De acordo com Machado (2011), nas minas subterrâneas os ambientes de trabalho em profundidade ficam mais quentes, devido principalmente ao aumento da temperatura da rocha virgem com a profundidade, os impactos da autocompressão, bem como o calor liberado pelo maquinário utilizado. As fontes de calor em uma mina podem ser divididas em dois grupos distintos: o primeiro inclui as fontes que dependem do local geográfico da mina e, por conseguinte do extrato rochoso, e o segundo compreende fontes derivadas das atividades humanas.

2.10.1 Qualidade ideal do fluxo de ar

Em frente de desenvolvimento, no caso de uso simultâneo de mais de um veículo ou equipamento a diesel, segundo a NR-22, item 22.24.7.3.1, deverá ser adotada a Equação 11 para o cálculo da vazão de ar fresco na frente de trabalho, no SI:

$$Q_t = 0.08(P_1 + 0.75P_2 + 0.5P_n) \quad (11)$$

Onde:

Q_T é a vazão total de ar fresco em m^3/s ;

P_1 é a potência em kW do equipamento de maior potência em operação;

P_2 é a potência em kW do equipamento de segunda maior potência em operação;

P_n é o somatório da potência em cavalo-vapor dos demais equipamentos em operação.

O critério para o caso em que a frente em desenvolvimento prossegue sem uso de veículos ou equipamentos a óleo diesel indica que a vazão de ar fresco deverá ser dimensionada à razão de quinze metros cúbicos por minuto por metro quadrado de área da frente em desenvolvimento. A legislação estipula também velocidades-limite do ar nos diversos ambientes mineiros, de acordo com as atividades ali desenvolvidas, representado no Quadro 9.

Quadro 9 - Velocidades limites do ar em subsolo.

Local	Velocidade-limite (m/s)
Local frequentado por pessoas	Mínima - 0,2 máxima - 8,0
Locais dedicados exclusivos para ventilação	10

Fonte: Normas Reguladoras de Mineração (2015).

2.10.2 Requisitos técnicos para determinação de vazão do ar

Naturalmente uma malha de ventilação de uma mina deve igualmente fundamentar-se em requisitos técnicos, logísticos e administrativos específicos à mina em foco, com vistas à qualidade do ambiente ventilado. Segundo McPherson (2008), um dos aspectos importantes a serem considerados ao se projetar e administrar um sistema de ventilação é o fato da necessidade de ser dimensionado com flexibilidade suficiente para permitir adaptações a condições de mineração variáveis que inevitavelmente ocorrerão ao longo da vida útil da mina. Portanto, os caminhos de adução e de retorno do ar viciado devem, por exemplo, ser projetados com uma folga para absorver essas variações dentro de certos limites.

Crítérios para o planejamento da “velocidade do ar” foram estabelecidos por várias entidades. A “*Mine Ventilation Society*” estabelece as velocidades ótimas do ar conforme o Quadro 10.

Quadro 10 - Velocidades do ar recomendadas.

Locais	Velocidade (m/s)
Galerias de entrada do ar	6,0 a 8,0
Galerias de retorno do ar	6,0 a 8,0
Poços verticais equipadas	10,0 a 12,0
Poços verticais não equipados	18,0 a 22,0
Poços inclinados	6,0 a 8,0
Galerias com correias transportadoras	2,0 a 3,0

Fonte: Normas Reguladoras de Mineração (2015).

Segundo Hartman (1991), o projeto de ventilação consiste em três etapas que compreendem a utilização dos “*layouts*”, planos de lavra e desenvolvimentos produzidos pela área de planejamento da mineração; a determinação das quantidades legais de ar requeridas para os ambientes específicos; a determinação da qualidade requerida para tais ambientes. O que é planejado originalmente para um sistema de ventilação de mina pode facilmente tornar-se inadequado levando-se em conta novas informações, uma mudança nos planos de produção ou uma variedade de outras razões. Isso é especialmente verdadeiro ao preparar o plano de ventilação de um novo empreendimento de lavra subterrânea.

As áreas de lavra ou realces são as áreas mais importantes em uma mina subterrânea, uma vez que a produção mineral, propriamente, provém dessas áreas. Em geral, elas também concentram a maioria dos trabalhadores da mina subterrânea. Porém, as operações subterrâneas modernas são caracterizadas por um grau muito alto de mecanização, cuja consequência resulta na necessidade de uma infraestrutura operativa significativa, tais como áreas de britagem, poços de transferência, locais de apoio para manutenção, estoque de óleo diesel, óleos lubrificantes e graxa, áreas de armazenagem de pneus, etc.

A estimativa da perda de ar por vazamentos é um processo empírico e baseia-se altamente na experiência e no conhecimento operacional do circuito. Inexatidões nas estimativas da vazão de ar em elementos singulares do circuito de ventilação, embora de pequenas consequências quando consideradas individualmente, poderão acumular erros acentuados na vazão total de ventilação como um todo (MCPHERSON, 2008).

$$\eta_{vent} = \frac{\text{Volumedearquechegaáfrentedeserviço}}{\text{Volumedeardeadução}} \quad (14)$$

De acordo com Machado (2011), eficiência η de um sistema de ventilação também pode ser expressa segundo a Equação 12, onde Q_t representa a vazão nominal na adução,

dimensionada de acordo com os critérios legais, Q_l são as perdas de ar ao longo do caminho até atingir as frentes de serviço, Q_o representando a ventilação acima do requerido nas frentes de lavra, Q_p é a ventilação de áreas operacionais tais como áreas de britagem e demais áreas auxiliares e Q_a sendo a vazão de ar realmente necessária nas áreas em lavra, teremos que a eficiência da ventilação pode ser estabelecida como:

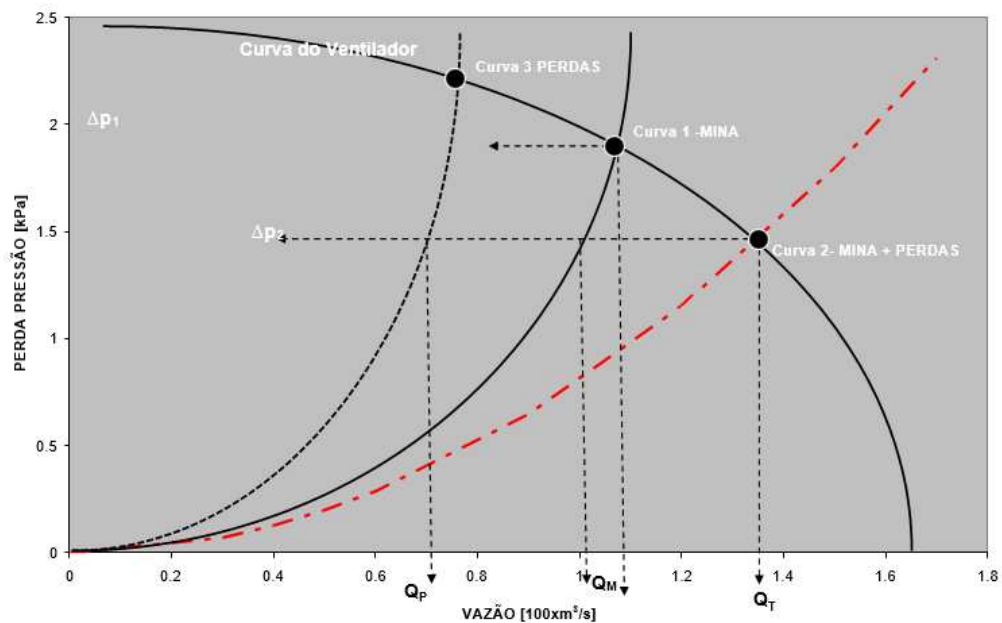
$$\eta_{vent} = \frac{Q_T}{Q_A} \quad (12)$$

Substituindo-se os valores na Equação 12 acima, teremos:

$$\eta_{vent} = \frac{Q_t - Q_l - Q_o - Q_p}{Q_t} \times 100\% \quad (13)$$

Segundo Hartman (1991) as perdas de ar agem como um caminho em paralelo de alta resistência com o circuito principal. Para além da baixa eficiência do sistema, as perdas no sistema de ventilação implicam em custos de energia elevados. A Figura 29 mostra a curva do sistema de um determinado circuito de ventilação contra a curva de um determinado ventilador, no ponto de encontro das mesmas, mostra essa resistência. A curva da mina, ou curva 01, mostra qual seria a vazão se não houvesse perdas, e a curva 03 é representativa das perdas de carga do sistema de ventilação. A curva 03 é a composição das curvas 01 e da curva 02.

Figura 29 - Curva do sistema de ventilação e de perdas.



Fonte: Machado (2011).

Como o sistema opera em paralelo, as vazões se somam, temos a curva 03. Isso mostra que o ventilador deverá suprir mais ar para compensar as perdas, implicando maior custo operacional embora menos ar chegue até as frentes de serviço. A legislação brasileira não faz menção às perdas de ar devido a curtos-circuitos nas escavações antigas, em tubos de ventilação danificados ou perdas nos dispositivos de controle (portas, paredes, tapumes, etc.). Porém, requer que a qualidade do ar ambiental esteja dentro dos limites estabelecidos pela NR-15 levando em consideração as perdas (Machado, 2011).

De acordo com o mesmo autor, a superventilação de áreas operacionais em lavra (Q_0), é dada, principalmente, devido ao fluxo de ventilação ser dimensionado para o pior cenário, normemente para as atividades de carregamento utilizando-se carregadeiras e caminhões. Nas outras partes do ciclo seria necessário um fluxo de ar muito reduzido, porém mantido a plena carga durante toda a vida da mina. Essas perdas podem ser evitadas através da ventilação por demanda. Já eficácia, em termos de ventilação, refere-se à ventilação que satisfaz os princípios básicos relacionados na legislação, ou seja:

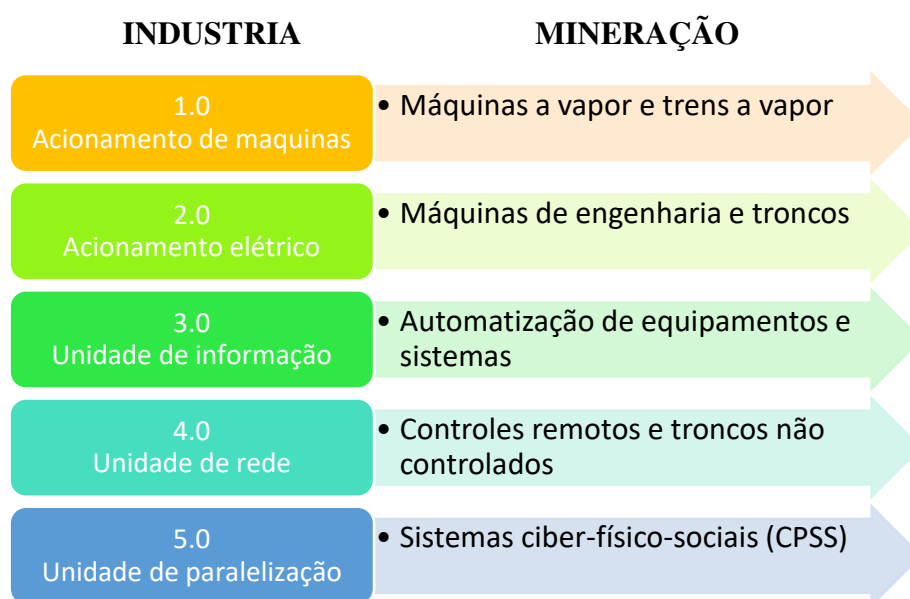
- Suprimento de oxigênio;
- Renovação contínua do ar;
- Diluição eficaz de gases inflamáveis ou nocivos;

- Diluição de poeiras do ambiente de trabalho;
- Redução da temperatura e manutenção de umidade adequada ao trabalho humano.

2.11 Mineração 5.0

Segundo a European Commission (2021), a Indústria 5.0 é um conceito visionário que considera a sustentabilidade, a centralidade no ser humano, a resiliência organizacional e a colaboração ser humano-máquina como uma tendência para o futuro da indústria. Vários autores observam que a Indústria 5.0 tem raízes no paradigma da Indústria 4.0 (Figura 30), caracterizando-a “como um avanço evolucionário, incremental (mas criticamente necessário) que se baseia no conceito e nas práticas da Indústria 4.0” (ÖZDEMİR; HEKIM, 2018).

Figura 30 - Desenvolvimento da indústria e da mineração.



Fonte: ADAPTADO EUROPEAN COMMISSION, 2021.

A indústria 4.0 propõe novos desafios na modelagem de sistemas de controle, tais como a integração de novas tecnologias de interação entre homens e máquinas, colaboração entre todas as entidades do sistema e maior autonomia no fornecimento de serviços ou produtos. Desenvolver este sistema de controle é uma tarefa complexa, e embora existam várias soluções para controle, a maioria delas são soluções proprietárias e tratadas de forma isolada para domínios específicos dos subsistemas da indústria. Por outro lado, considera-se que uma combinação adequada de diferentes técnicas possibilita desenvolver um método para concepção

e análise de um sistema de controle que atenda aos requisitos propostos pelo paradigma (SILVA; FILHO; MIYAGI, 2015).

De acordo com Özdemir e Hekim (2018), em minas subterrâneas de carvão com uma extensa rede de galerias, existem sistemas ou saídas seguras, alternativamente, estações de refúgio seguros conectados à superfície através de um poço que fornecem ar, água e alimentos em caso de colapso parcial ou total da mina. Notavelmente, esta consideração de design a nível de sistema para uma saída segura do ecossistema de inovação também poderia ajudar a diversificar e enriquecer as estruturas conceituais dominantes que orientam as inovações práticas e, por extensão, remediar as bolhas de filtro que poderiam existir em uma Indústria 4.0 em ecossistemas de inovação.

Embora a Indústria 4.0 ainda não esteja bem desenvolvida, os últimos anos testemunharam pesquisas que possibilitaram progressos na implementação da quinta etapa desta jornada, a Indústria 5.0. Esta fase, como já mencionado, concentra-se em conceitos de sustentabilidade, bioeconomia e um ambiente colaborativo de tecnologia e seres humanos, fabricação autônoma com inteligência humana, estabelecendo assim uma indústria resiliente que incorpora valores sociais e humanos (NAHAVANDI, 2019; EUROPEAN COMMISSION, 2021). Apesar do dissenso conceitual, é possível identificar um alinhamento no que se refere à Indústria 5.0 fornece uma visão da indústria que vai além da eficiência e produtividade como os únicos objetivos, reforçando o papel e a contribuição da indústria para a sociedade (EUROPEAN COMMISSION, 2021).

De acordo com Xia *et al.* (2012), a conectividade da Indústria é obtida através da Internet das Coisas (*Internet of Things – IOT*), que integra os mais diferentes objetos de nosso cotidiano e aumenta a ubiquidade da Internet, construindo uma rede de comunicação entre pessoas e dispositivos. Segundo Germany (2002), a popularização das aplicações da eletrônica decorrente da queda de custos relacionado aos sistemas em minas subterrâneas vem contribuindo de forma significativa nos aspectos de monitoramento e controle. A aplicação de sistemas automatizados para monitoramento de condições ambientais relativas aos maciços rochosos e à ventilação, além de outros sistemas, ainda são pouco comuns, mas muito promissora em termos de segurança e produtividade agregadas.

2.12 Sistemas embarcados

2.12.1 Microcontroladores

Os microcontroladores surgiram como uma evolução natural dos circuitos digitais devido ao aumento da complexidade dos mesmos. O primeiro microcontrolador foi lançado pela empresa Intel em 1977 e recebeu a sigla “8048”. Com a sua posterior evolução, foi dada origem à família “8051”. Esse chip é programado em linguagem *Assembly* e possui um poderoso conjunto de instruções (PENIDO, 2013).

Penido (2020) afirma que, esses dispositivos são caracterizados por um computador muito pequeno em um único chip, podendo ser definidos por um circuito integrado que reúne um núcleo de processador, memórias voláteis e não voláteis e diversos periféricos de entrada e saída de dados. Os dispositivos possuem a capacidade de realizar determinadas tarefas de forma otimizada diante do tamanho altamente compacto. Além disso, podem ter custo acessível que atendem a uma demanda específica. Nesse contexto, estão presentes em diversos equipamento eletrônico utilizados no nosso cotidiano, como celulares, relógios, televisores, veículos, entre outros.

De acordo com Cardoso (2020), no mercado existem três grandes marcas que são bastante populares dentro do nicho de microcontroladores. São elas: a linha PIC da Microchip, a Intel MCS da Intel e o Atmel AVR da Atmel. Pode-se dizer também que a mais popular dentre as três seria a Atmel, uma vez que é a linha utilizada nas placas de Arduino, plataforma bastante difundida entre estudantes devido à sua simplicidade e acessibilidade. Esses aparelhos podem atuar na automação de sistemas eletrônicos no qual podem substituir a necessidade de um operador para realizar tarefas, como por exemplo, acionamento de sensores e travas, regulação de sistemas, controle de iluminação e temperatura, dentre outros.

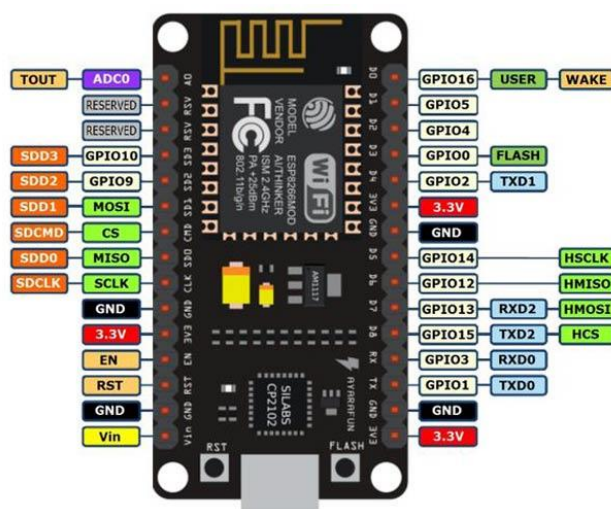
Com base na evolução tecnológica e de acordo com as afirmações dos autores é notável que os microcontroladores possuem um papel importante no nosso cotidiano. Além disso, possuem a funcionalidade de criar e otimizar processos presentes na indústria, como por exemplo, na mineração, engenharia, computação, entre outras áreas. Em função das demandas específicas que o mercado estabelece os processos cíclicos necessitam acompanhar o avanço tecnológico aplicado a maior produtividade e segurança dessas atividades.

2.12.2 ESP8266

Barros (2012) também afirma que, o dispositivo microcontrolador é composto por uma plataforma de computação física (elementos digitais ligados a sensores e atuadores, que permitem construir sistemas complexos que percebam a realidade e respondam com ações físicas), baseada em uma simples placa de Entrada/Saída microcontrolada e desenvolvida sobre uma biblioteca que simplifica a escrita da programação em C/C++.

Queiroz *et al.* (2018) explica que a linguagem de programação corresponde ao controle de microcontroladores, como por exemplo, Arduino, RaspBerry Pi, e o módulo ESP8266 representado na Figura 31. Dessa forma, necessita do uso de um ambiente de desenvolvimento que faça a leitura dessa linguagem através do *hardware* e, realize as etapas necessárias para gravar e compilar o código entre a interface do computador e a plataforma. Nesse sentido, é possível programar módulos e sensores conectados à placa que integram e expandem a conexão fundamentada aos comandos desta.

Figura 31 – NodeMCU ESP8266 Pinos.

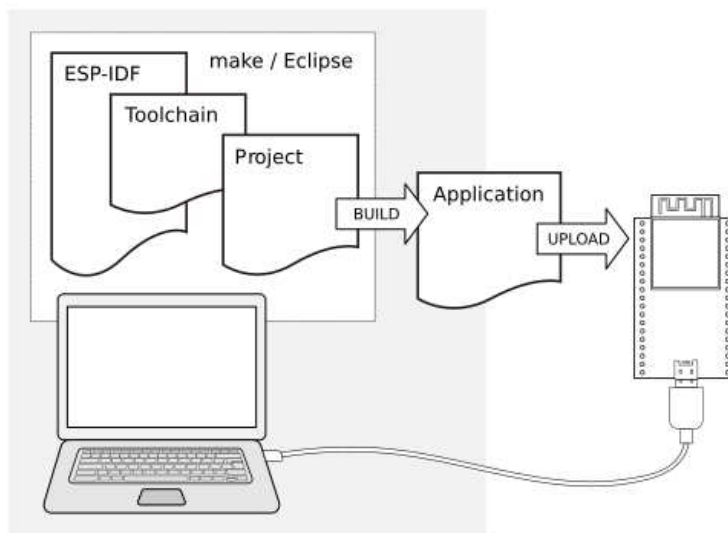


Fonte: (DATASHEET, 2023).

O ESP8266 oferece uma solução Software Integrado de Gestão Ocupacional Wi-Fi altamente eficaz para atender às demandas contínuas dos usuários por uso eficiente de energia, design compacto e desempenho confiável na indústria da Internet das Coisas. Com os recursos de rede Wi-Fi completos e autônomos, o ESP8266 pode funcionar como um aplicativo independente como representado na Figura 32 ou como escravo de um MCU host. O ESP8266 hospeda o aplicativo e inicializa imediatamente a partir do flash. O cache de alta velocidade integrado ajuda a aumentar o desempenho do sistema e otimizar a memória do sistema. Além disso, o ESP8266 pode ser aplicado a qualquer design de microcontrolador como um adaptador

Wi-Fi por meio de interfaces SPI/SDIO ou UART. O ESP8266 integra interruptores de antena, balun RF, amplificador de potência, amplificador de recepção de baixo ruído, filtros e módulos de gerenciamento de energia (DATASHEET, 2023).

Figura 32 - Desenvolvimento de aplicações para ESP8266.



Fonte: (ESPRESSIF SYSTEMS, 2022).

De acordo com *Espressif Systems* (2022), o ESP32 é um sistema dual-core com duas CPUs *Harvard Architecture Xtensa LX6*. Toda a memória incorporada, externa a memória e os periféricos estão localizados no barramento de dados e/ou no barramento de instruções dessas CPUs. O mapeamento de endereço de duas CPUs é simétrico, o que significa que utilizam os mesmos endereços para acessar a mesma memória. Vários periféricos no sistema podem acessar memória via DMA. As duas CPUs são denominadas “PRO CPU” e “APP CPU” (para “protocolo” e “aplicativo”), no entanto, para a maioria das finalidades, as duas CPUs são intercambiáveis.

Segunda a Datasheet (2023) o design compacto minimiza o tamanho do PCB e requer circuitos externos mínimos. Além das funcionalidades Wi-Fi, o ESP8266EX também integra uma versão aprimorada do processador de 32 bits da série L'106 Diamond da Tensilica e SRAM no chip. Ele pode ser interligado com sensores externos e outros dispositivos por meio dos GPIOs. O Kit de Desenvolvimento de Software (SDK) fornece códigos de amostra para vários aplicativos. A Plataforma de Conectividade Inteligente (ESCP) da Espressif Systems permite recursos sofisticados incluindo:

- Troca rápida entre o modo de suspensão e ativação para fins de eficiência energética;

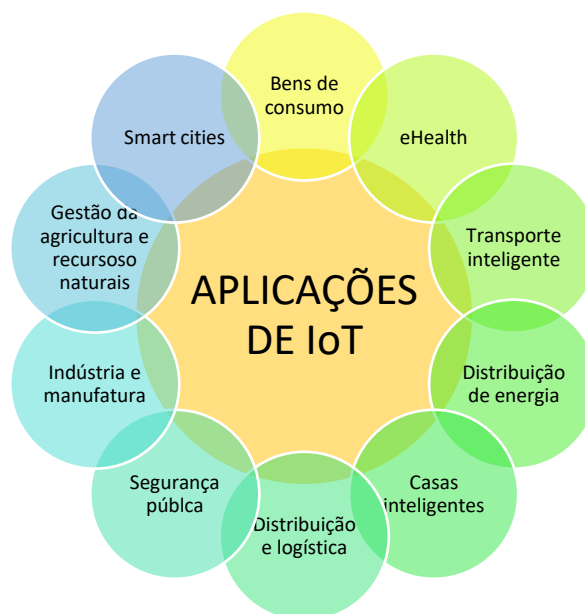
- Polarização de rádio adaptável para operação de baixo consumo
- Processamento avançado de sinal
- Cancelamento de estímulo e mecanismos de coexistência de RF para mitigação de interferência comum de celular, Bluetooth, DDR, LVDS, LCD.

2.13 Internet das coisas (IOT)

Estamos testemunhando o surgimento de uma nova era da Internet das Coisas (IoT). De modo geral, IoT refere-se à interconexão em rede de objetos do cotidiano como visto na Figura 33, que geralmente são equipados com inteligência onipresente. A IoT aumentará a onipresença da Internet integrando todos os objetos para interação por meio de sistemas embarcados, o que leva a uma rede altamente distribuída de dispositivos que se comunicam com seres humanos e outros dispositivos. (XIA *et al.* 2012).

De acordo com Gonçalves (2018), para que a IoT possa existir são necessários alguns elementos, como: os sensores, instalados na máquina e a rede, que “transportará” as informações provenientes dos diversos sensores instalados no local de interesse. A partir daí, é possível escolher o caminho que os dados obtidos farão. Eles podem ser enviados diretamente para dispositivos móveis, como tablets ou smartphones, acelerando as tomadas de decisões, ou podem ser enviados para um servidor, capaz de trata-los rapidamente e reenviar novas instruções, quando necessário. Esses elementos serão estudados em detalhe nesse trabalho.

Figura 33 - Aplicações da Internet das Coisas.



Fonte: Adaptado Silva et al (2019).

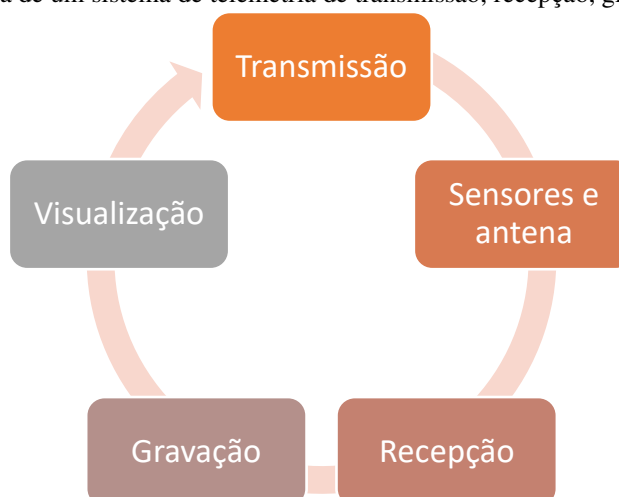
De acordo com Silva *et al* (2019), a internet das coisas está transformando negócios de diversos setores, viabilizando novas formas de rentabilização. De certa forma, já faz parte da nossa rotina e surge como uma mola propulsora de mudanças. Pode-se imaginá-la como se fosse um sistema nervoso que possibilita a troca de informações entre dois pontos ou mais, onde coisas do cotidiano se tornam inteligentes e têm suas funções ampliadas pelo cruzamento de dados.

Na mineração, a aplicação da IoT promete benefícios como o aumento do nível de automação e melhorias na eficiência da produção, e nas tomadas de decisão, tornando a empresa mais competitiva no mercado. Diante do exposto acima, esse trabalho tem por objetivo conceituar, estabelecer diretrizes básicas para a implantação da IoT em empresas de 2 mineração e mostrar estudos de casos que exemplifiquem o potencial dessas novas tecnologias (Gonçalves, 2018).

2.14 Telemetria

De acordo com Mattos (2004), a palavra telemetria é a união de duas palavras gregas. *Tele* significa longe e *meter* significa medir. Por isso telemetria (TM) significa realizar medições à distância, ou em local remoto. A telemetria assurgiu da necessidade de realizar medições em locais inacessíveis, como a temperatura dentro de um forno, e evoluiu em uma ciência complexa capaz de realizar medições dentro de um míssil guiado, ou em qualquer local remoto. Logo, o funcionamento do sistema é composto por transmissão, recepção, gravação/arquivamento e visualização (Figura 34).

Figura 34 - Visão simplificada de um sistema de telemetria de transmissão, recepção, gravação e visualização.



Fonte: Adaptado Mattos (2004).

Santos *et al.* (2020) afirma que, a telemetria é uma tecnologia que permite a transmissão de dados, e envia informações de interesse do operador ou desenvolvedor de sistemas para um receptor que faz o processamento desses dados, podendo esse monitoramento ser medido ou rastreado à distância com dispositivos de comunicação sem fio, como sinais de rádio (ondas) ou satélites. A telemetria é utilizada em pontos geograficamente distantes ou em pontos que se movimentam continuamente (exemplo: automóveis, caminhões e ônibus), fazendo a coleta de informações e transmitindo as mesmas para uma central de controle que faz o acompanhamento e decifra esses dados.

De acordo com Santos *et al.* (2020), no monitoramento de veículos a telemetria é considerada um sistema integrado onde é realizada a captura de informações por meio digital. Tem como finalidade comandar, medir e rastrear os veículos de forma remota, garantindo segurança e assertividade no gerenciamento e também na prevenção de riscos e sinistros. Por intermédio das informações obtidas, os dados são interpretados e utilizados para auxiliar na tomada de decisões. A telemetria também pode ser aplicada em diversas áreas, como na mineração, agricultura, meteorologia, automobilismo, entre outras. Seu uso possibilita a redução de custos provenientes de danos nos equipamentos, monitoramento e detecção de problemas.

2.15 Transmissão de dados Wireless

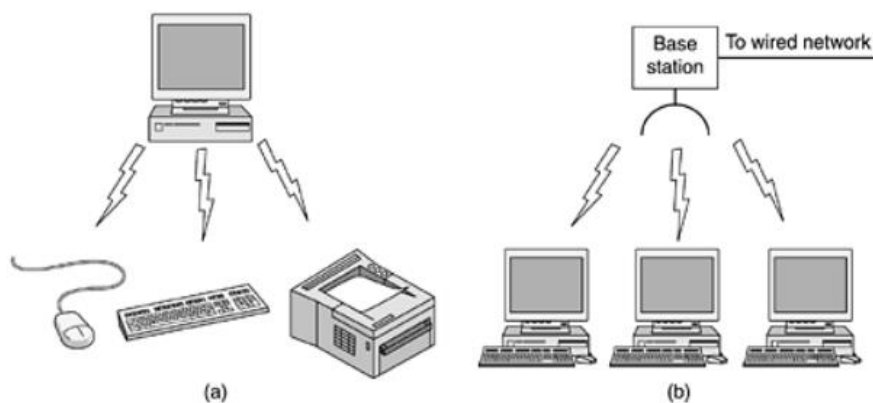
A comunicação digital sem fios não é uma ideia nova. Em 1901, o físico italiano Guglielmo Marconi demonstrou como funcionava um telégrafo sem fio que transmitia informações de um navio para o litoral por meio de código Morse (afinal de contas, os pontos e traços são binários). Os modernos sistemas digitais sem fios têm um desempenho melhor, mas a ideia básica é a mesma. Em uma primeira aproximação, redes sem fios podem ser divididas em três categorias principais: Interconexão de sistemas, LANs (*Local Area Network*) sem fios e WANs (*Wide Area Network*) sem fios (TANENBAUM, 2003).

De acordo com Tanenbaum (2003), a interconexão de sistemas significa interconectar os componentes de um computador usando rádio de alcance limitado. Quase todo computador tem um monitor, um teclado, um mouse e uma impressora, conectados por cabos à unidade principal. Alto é o número de novos usuários que enfrentam grande dificuldade para conectar todos os cabos aos pequenos orifícios corretos (embora em geral estes sejam codificados com cores). Nesse sentido, algumas empresas se uniram para projetar uma rede sem fio de alcance limitado chamada *Bluetooth*, a fim de conectar esses componentes sem a utilização de fios. A

rede *Bluetooth* também permite a conexão de câmeras digitais, fones de ouvido, *scanners* e outros dispositivos a um computador, simplesmente trazendo-os para dentro do alcance da rede. Sem a necessidade de cabos e da instalação de *drivers*; bastando juntá-los e ligá-los e estes funcionarão facilitando a operação.

Tanenbaum (2003) afirma que as redes de LANs sem fios são sistemas em que todo computador tem um sistema via rádio e uma antena por meio dos quais pode se comunicar com outros sistemas. Frequentemente, existe uma antena no teto que permite a comunicação das máquinas, como mostra a Figura 35. Porém, se os sistemas estiverem próximos o bastante, eles poderão se comunicar diretamente um com o outro em uma configuração não hierárquica.

Figura 35 - (a) Configuração da Bluetooth (b) LAN sem fios.



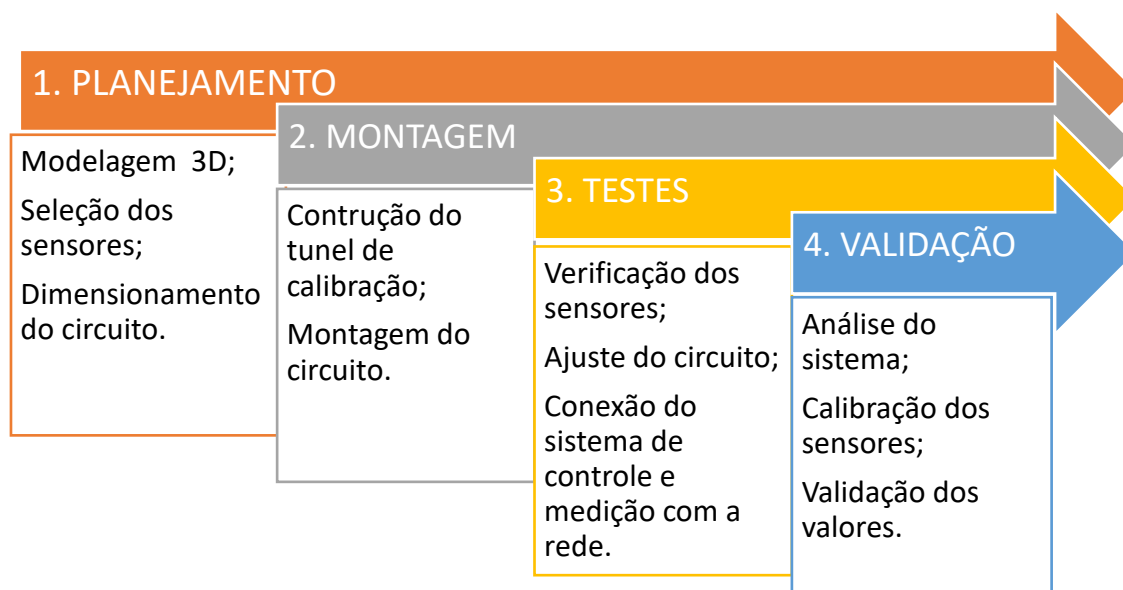
Fonte: (TANENBAUM, 2003).

O terceiro tipo de rede sem fio é usado em sistemas geograficamente distribuídos. A rede de rádio utilizada para telefonia celular é um exemplo de sistema sem fio de baixa largura de banda. Esse sistema já passou por três gerações. A primeira geração era analógica e usada apenas para voz. A segunda geração era digital e apenas para voz. A terceira geração é digital e se destina a voz e dados. Em certo sentido, as redes celulares sem fios são semelhantes às LANs sem fios, exceto pelo fato de que as distâncias envolvidas são muito maiores e as taxas de bits muito mais baixas (TANENBAUM, 2003). Portanto, quase todas as redes sem fios se conectam à rede de fiação em algum ponto, a fim de fornecer acesso a arquivos, bancos de dados e à Internet. Existem muitos modos de realizar essas conexões, dependendo das circunstâncias.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa será executada em quatro etapas: planejamento, montagem, testes e validação do protótipo, como nos passos que se seguem (Figura 36).

Figura 36 - Etapas do projeto.



Fonte: Autor (2024).

3.1 Planejamento

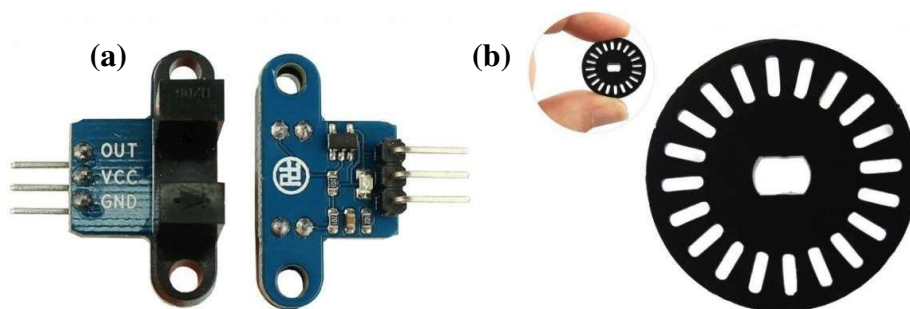
Inicialmente o estudo desenvolvido foi fundamentado partindo da ideia de construção de um protótipo que pudesse medir o fluxo de ar em minas subterrâneas através de um sistema móvel possível de se deslocar em lugares estratégicos a longo alcance manuseado por um operador. Além disto, pensou-se em um protótipo que gerasse gráficos do fluxo de ar, temperatura, pressão e concentração de gases de forma autônoma, e fosse capaz de enviar e fornecer os dados através da telemetria. Para atender às referidas necessidades, pensou-se na utilização de diferentes sensores que fossem capazes de captar as informações de velocidade do fluxo de ar. Assim, a maneira de se coletar os dados para a leitura e tratamento deles, seria conectando os sensores a um sistema embarcado responsável pela programação e leitura dos valores medidos.

Os sensores selecionados para a utilização no protótipo foram escolhidos de acordo com sua utilidade, forma de medição, precisão, robustez e custo, sendo eles os sensores óptico, de

temperatura, pressão atmosférica, umidade e concentração de gases. O circuito foi planejado com auxílio um *software* especializado que pertence a empresa *Autodesk* denominado *tinkercad* para modelagem 3D, planejamento do circuito, sensores, atuadores e microcontroladores, assim como, definidos os parâmetros de programação computacional para que o protótipo obtenha êxito ao que se destina. Além disso, foi planejado um túnel de vento para testes do sensor, que irá medir o fluxo no ponto de medição, proporcionando a aquisição de dados e controle da calibração dos sensores.

O sensor óptico ilustrado na Figura 37 tem conexão por radiação infravermelha com módulo de contagem de sinal em uma direção, no qual, pode ser usado para detecção da velocidade de motores com o auxílio de um disco encoder, ilustrado na figura abaixo. Este tipo de sensor mede o número de interrupções de um sinal infravermelho e calcula a frequência disso em uma unidade de tempo. Neste protótipo, foi utilizado o sensor do tipo encoder HC-020K. Medindo quantas interrupções foram geradas e, assim, pôde-se calcular as rotações por minuto (RPM) da hélice, sabendo a quantidade de furos que o disco encoder possui.

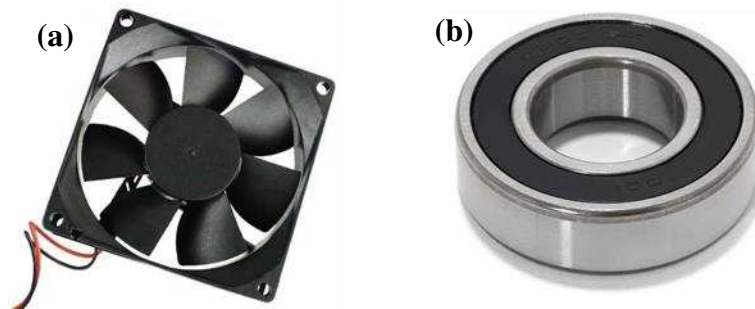
Figura 37 - Sensor óptico, disco encoder.



Fonte: USINAINFO.

Para o sistema que mede o fluxo de ar foi utilizada uma hélice de ventoinha (cooler de computador) representado na Figura 38. Dessa forma, na extremidade superior do protótipo foi implementado um suporte feito de sucata eletrônica para o acoplamento de um rolamento tipo “harley” reciclado de sucata de HD, ilustrado na figura abaixo, para garantir que o sistema aerodinâmico seja fluido, com o mínimo de atrito possível. Na circunferência de abertura do rolamento é engatado um cilindro nas dimensões do mesmo, a qual terá a função de sustentar a hélice no eixo.

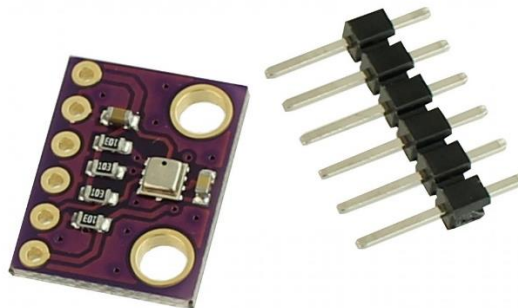
Figura 38- (a) Cooler de computador e (b) rolamento tipo “harley”.



Fonte: USINAINFO.

O sensor de BME280 utilizado (Figura 39) é capaz de realizar a medição de pressão atmosférica, umidade e temperatura. Também conhecido como barômetro, é um módulo digital de alta capacidade e resolução com margem de erro das medições em torno de $\pm 0,008\%RH$ para umidade, $\pm 0,01^{\circ}C$ para temperatura e $\pm 1Pa$ para pressão, utilizado nas mais diversas aplicações junto a microcontroladores. Gerando dados de monitoramento confiáveis.

Figura 39- Sensor BME280.



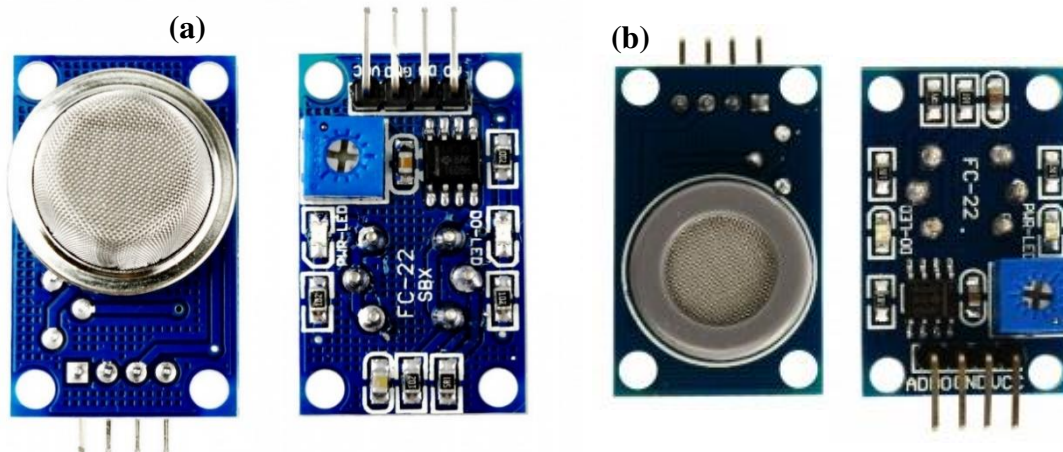
Fonte: USINAINFO.

O sensor de gás MQ-2, ilustrado na Figura 40, detecta gás inflamável e fumaça, sendo um dispositivo de segurança utilizado para diversos projetos que adotam como base plataformas de prototipagem em sistemas embarcados. O sensor possui *trimpot* para calibração do ponto de acionamento sendo capaz de detectar gases de diferentes tipos, como gás de petróleo liquefeito, butano, propano, metano, hidrogênio, álcool, gás natural ou mesmo fumaça.

O sensor MQ-7, ilustrado na Figura abaixo, detecta especificamente monóxido de carbono (CO), um gás tóxico e invisível. O mesmo também possui um *trimpot* para calibração do ponto de acionamento.

Quando os sensores detectam a presença do gás ou da fumaça, liberará um sinal de aviso ao ESP8266, se for o caso, que estará programado para realizar diferentes tarefas, como por exemplo, liberar trancas de portas, emitir sinais sonoros e luminosos.

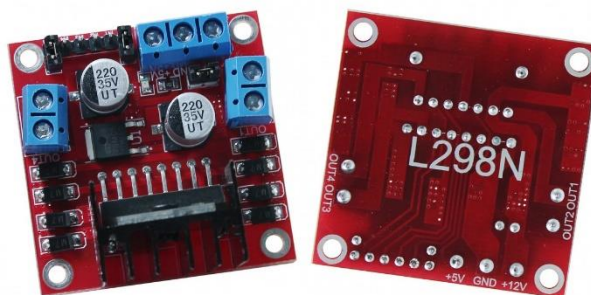
Figura 40- (a) Sensor MQ2 e (b) Sensor MQ7.



Fonte: USINAINFO.

O módulo driver Ponte H é um módulo desenvolvido para controlar motores de corrente contínua ou motores de passo em conjunto com sistemas embarcados. O Ponte H ilustrado na Figura 41 pode ser utilizado com diversos microcontroladores obtendo máximo desempenho no controle dos motores. Sua funcionalidade é simples sendo possível facilmente controlar a velocidade ou sentido de rotação dos motores de corrente contínua ou de passo. O módulo se destaca pela sua robustez. Dessa forma, sua implementação é essencial para o controle individual das rodas do protótipo.

Figura 41 - Módulo Ponte H – L298N.



Fonte: USINAINFO.

Com os dispositivos pré-definidos, o projeto do protótipo foi idealizado através de uma ferramenta de modelagem tridimensional denominada “Tinkercad”, na qual, foi possível a criação do design em modelo 3D do protótipo.

3.2 Montagem do protótipo e teste dos sensores

Antes da montagem do protótipo de anemômetro mediu-se a velocidade do ar através de uma hélice acoplada em um rolamento. Assim, a velocidade de rotação gerada pela hélice, sob fluxo de ar, foi medida em rotações por minuto pelo sensor óptico. Por fim, com os valores coletados foi possível gerar uma função que converteu os valores de velocidade do fluxo de ar conseguidos em RPM para metros por segundo. Para medição da temperatura, umidade e pressão atmosférica foi instalado o sensor BME 280 pouco atrás da hélice, para fazer esta medição no ar próximo a esta.

A estrutura escolhida para a montagem do equipamento consistiu em um carro feito de MDF ilustrado na Figura 42 composto por quatro rodas movidas a motores (Figura abaixo) controlados através do módulo driver Ponte H presente na Figura 41 mostrada anteriormente.

Figura 42- (a) Partes do chassi de MDF e (b) Conjunto roda motor.



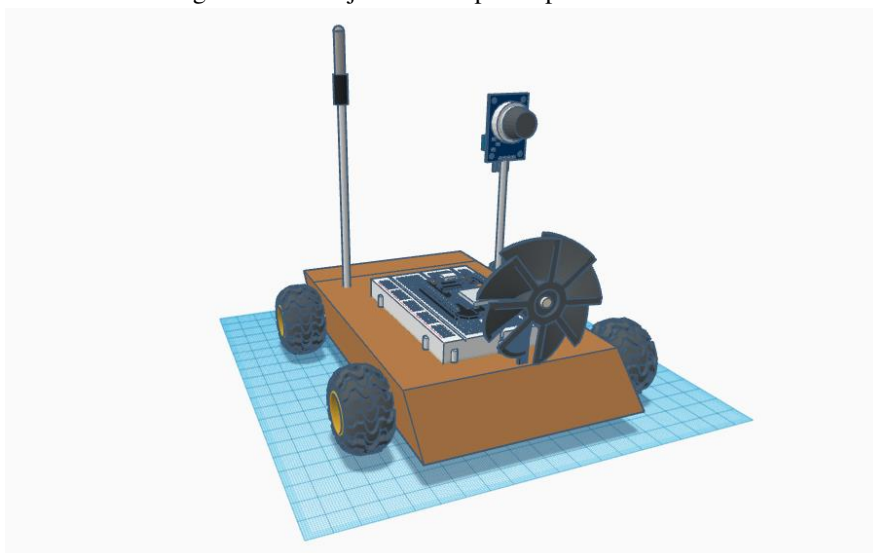
Fonte: USINAINFO.

3.2.1 Tinkercad

O Tinkercad é uma plataforma online gratuita destinada à criação de designs em 3D. Com uma interface intuitiva e acessível, a ferramenta possibilita que os usuários desenvolvam projetos de maneira prática e direta, utilizando formas geométricas básicas para compor uma ampla variedade de objetos e criações. Dentro do Tinkercad, os usuários têm à disposição uma gama de formas geométricas fundamentais que funcionam como blocos essenciais para a construção de projetos tridimensionais. É possível combinar, duplicar, separar, alinhar e espelhar essas formas predefinidas até alcançar o design final desejado.

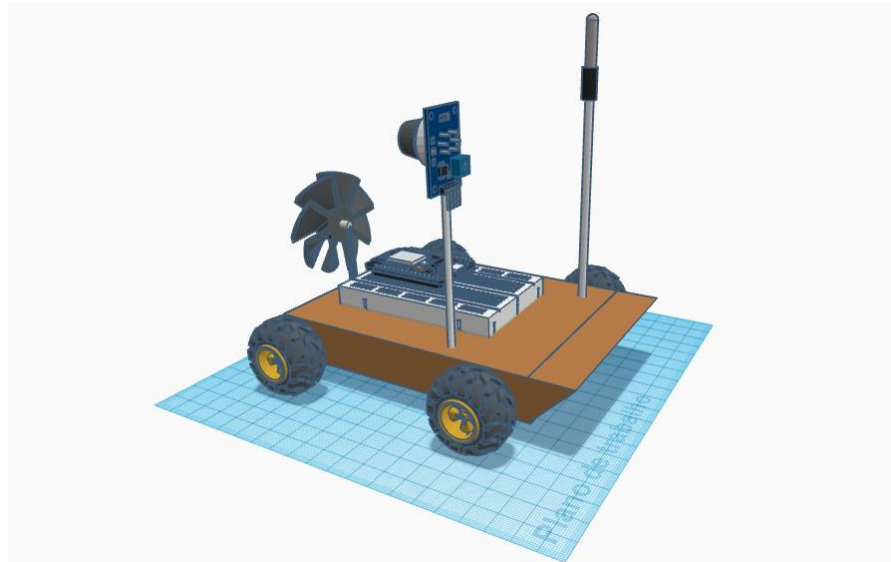
Além disso, o *software* permite a simulação de circuitos elétricos, tanto analógicos quanto digitais. A plataforma inclui ferramentas para depuração e análise, que auxiliam na identificação e correção de falhas em circuitos, como o uso de multímetros virtuais e a visualização de gráficos de forma de onda. Com os sensores definidos para atender a demanda foi planejado um modelo 3D no *software* tinkercad onde o protótipo tivesse a possibilidade de se deslocar com o sistema de medição acoplado ao mesmo. Nesse sentido, foi projetado uma hélice de eixo horizontal acoplada a uma estrutura de material MDF em forma de chassi dando suporte ao protótipo. As Figuras 43 e 44 ilustram as interligações entre o microcontrolador, módulo e sensores, por intermédio de uma protoboard.

Figura 43- Planejamento do protótipo no tinkercad.



Fonte: (AUTOR, 2023).

Figura 44- Planejamento do protótipo no tinkercad.



Fonte: (AUTOR, 2023).

3.2.1 Pseudocódigo

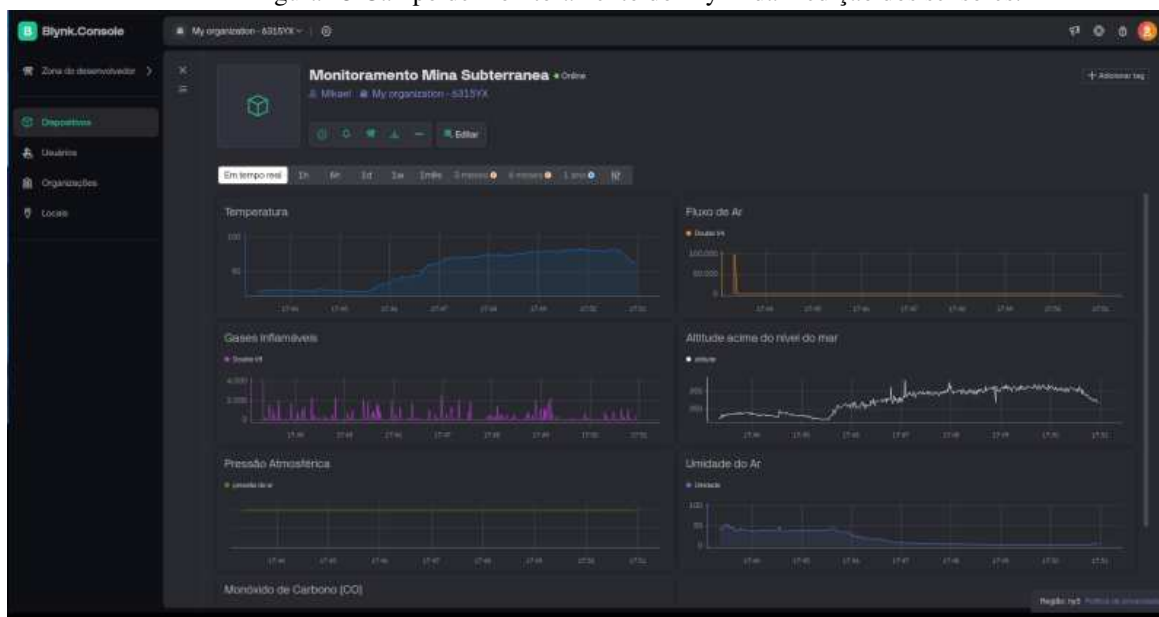
Para o funcionamento do protótipo, medição e coleta de dados é necessária uma forma de representar os algoritmos, funções ou outros processos usando uma combinação de linguagem natural. Para isso, foi utilizado linguagem de programação para representar esses elementos fundamentais para funcionamento desse conjunto entre controle da movimentação e medição do protótipo.

Para início, foi utilizado o *software* Arduino IDE para programação do sistema, por ser gratuito e permitir o desenvolvimento e a gravação de códigos ao microcontrolador da placa integrada. Para isso, se fez necessário adicionar e instalar o pacote de placas do módulo ESP8266. Com a instalação feita e o modelo da placa correta selecionado, foi possível entrar no modo de gravação e carregar o código para a placa, no caso do Arduino IDE. A linguagem de programação utilizada é C++ com pequenas modificações. Após a conexão dos jumpers entre a placa, protoboard e sensores é possível programar o sistema para responder aos comandos desejados.

3.2.2 Blynk

Diante do planejamento do projeto mostrou-se a necessidade de organização dos valores que estão sendo medidos. Buscou-se representar aqueles valores reais conectados em rede para que pudessem ser acessados através da internet. Com isso foi utilizada a Blynk, uma plataforma de IoT que permite controlar e monitorar dispositivos conectados à internet de forma simples e eficiente. A Blynk é amplamente utilizada para projetos com microcontroladores, para facilitar a comunicação com uma plataforma embarcada sem a necessidade de conhecimentos avançados em programação e, em alguns casos, que não é preciso escrever uma única linha de código. A ferramenta possibilita o controle remoto dessas plataformas, permitindo que dados de sensores e módulos sejam capturados e exibidos diretamente em um aplicativo instalado no dispositivo móvel. Além disso, permite o acionamento de cargas e oferece uma série de outras funcionalidades integradas.

Figura 45 Campo de monitoramento do Blynk da medição dos sensores.



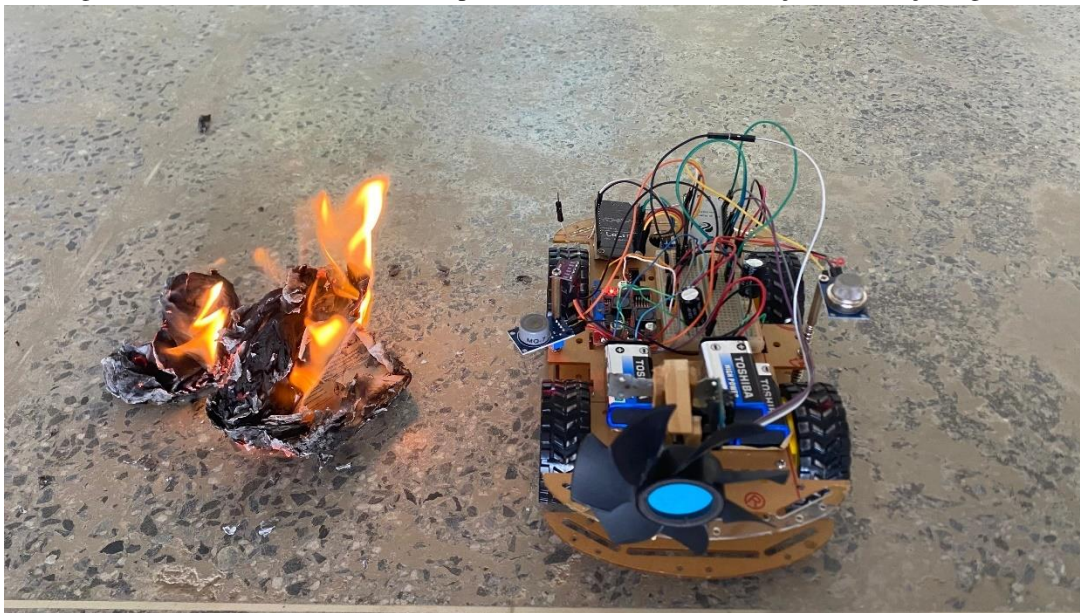
Fonte: (AUTOR, 2024).

Um dos principais diferenciais da Blynk é a capacidade de controlar a plataforma de qualquer lugar do mundo via aplicativo móvel. Para isso, é necessário apenas que a plataforma esteja configurada e conectada ao servidor Blynk pela internet, e que o aplicativo no dispositivo móvel também esteja online.

3.3 Validação do protótipo

Nesta etapa, o protótipo foi montado de acordo com o planejamento e pronto para a validação, como ilustrado na Figura 46 e 47. Desta forma, foi gerado um fluxo de ar por meio de um ventilador convencional residencial, que dispusera de 3 velocidades diferentes para este fluxo. Além disso, também foi pensado, como maneira de reduzir interferências no sistema de ventilação, a construção de um túnel de vento. Ademais, foram feitos testes com queima de papel próximo ao protótipo (Figura 46) para testar o funcionamento dos sensores, e com isso, partir para os experimentos.

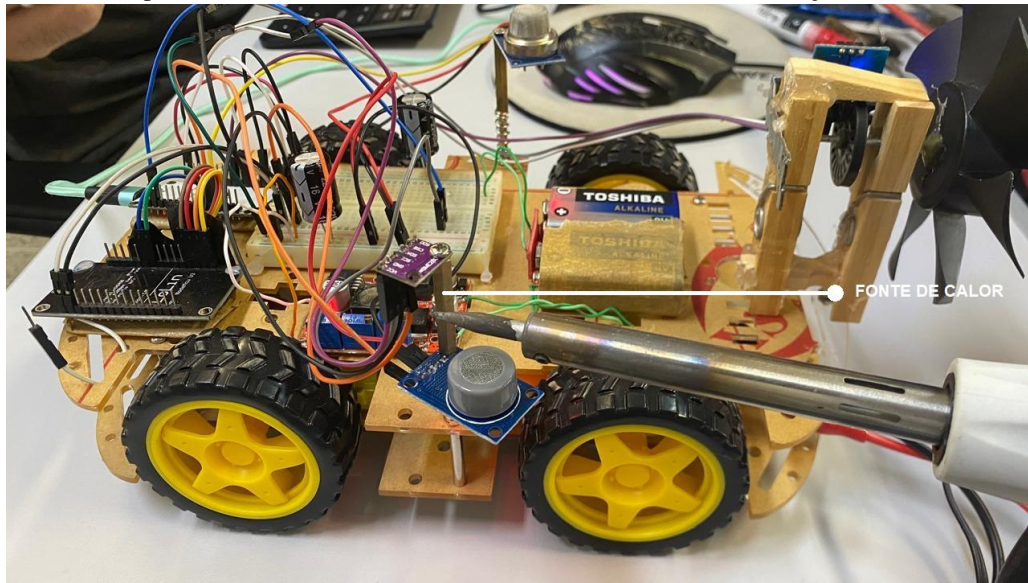
Figura 46– Teste dos sensores de temperatura, umidade e concentração de fumaças e gases.



Fonte: (AUTOR, 2023).

O segundo teste foi conduzido em uma sala climatizada, mantendo uma temperatura média de 21°C (Figura 47). O sensor BME 280 foi posicionado para medir a temperatura ambiente, pressão atmosférica e umidade. Durante o período experimental de cinco minutos, um ferro de solda foi utilizado como fonte de calor próxima ao sensor, a fim de observar suas reações às mudanças térmicas.

Figura 47– Protótipo montado durante teste do sensor BME280 através da excitação de uma fonte de calor.



Fonte: (AUTOR, 2023).

4 RESULTADOS E DISCURSÕES

Com os passos, anteriormente discutidos na metodologia, executados, foi possível a realização do planejamento e montagem do protótipo objeto de estudo deste trabalho. Neste tópico serão discutidos os resultados encontrados ao final da construção do protótipo.

4.1 Temperatura

Inicialmente, os dados captados pelo sensor indicaram uma temperatura de 20,51°C, uma pressão atmosférica de 972,364 Pa e uma umidade relativa do ar de 39,084 %. À medida que o ferro de solda foi se aproximando do sensor, a temperatura registrada aumentou significativamente, resultando em uma variação nos gráficos gerados e coletados pela Blynk em tempo real. Ao final do experimento, a temperatura registrada pelo sensor aumentou. Durante todo o teste, a pressão atmosférica permaneceu constante, enquanto a umidade relativa apresentou uma queda gradual devido ao aumento da temperatura no ambiente próximo ao sensor.

Com a aproximação da fonte de calor no protótipo, houve um aumento gradual na temperatura conforme o ferro esquentava, atingindo um pico máximo de 82,79°C. Esse aumento foi visível nos gráficos, evidenciando a resposta rápida do sensor à variação térmica. Após a remoção da fonte de calor, a temperatura começou a diminuir gradualmente, voltando a se estabilizar em valores próximos aos iniciais. Essa observação demonstra a precisão e a sensibilidade do sensor em captar flutuações de temperatura em tempo real.

Figura 48- Gráfico de temperatura.



Fonte: (AUTOR, 2024).

4.2 Umidade

A umidade relativa inicial captada foi de 47,82 %. Com a introdução da fonte de calor, a umidade no entorno do sensor diminuiu gradualmente, atingindo um mínimo de 1,06 %. De acordo com o experimento, essa queda se deve ao aquecimento do ar que reduz a capacidade do ar de reter umidade, fazendo com que a umidade relativa caia drasticamente. Após a remoção do ferro de solda, a umidade começou a se elevar de forma lenta, estabilizando à medida que o ambiente esfriava e retornava às condições normais. Os gráficos mostraram uma curva descendente durante a exposição ao calor, seguida por uma recuperação gradual após a remoção da fonte de calor.

Figura 49- Gráfico de umidade do ar.



Fonte: (AUTOR, 2024).

4.3 Pressão atmosférica

A pressão atmosférica inicial medida pelo sensor foi de 972,364 Pa. Durante o experimento, a pressão permaneceu praticamente constante, mesmo com a influência da fonte de calor. Isso era esperado, pois não houve variação da altitude no local da medição, nem gerado artificialmente variação de pressão no ambiente controlado. Essa constância nos valores foi confirmada pelos gráficos e tabelas gerados, indicando que a proximidade do ferro de solda não teve impacto significativo sobre a pressão medida.

Figura 50- Gráfico da pressão atmosférica



Fonte: (AUTOR, 2024).

4.4 Altitude

A altitude registrada no experimento foi de 350 metros acima do nível do mar. Ao longo da realização do estudo, a altitude manteve-se essencialmente constante, mesmo sob a influência de uma fonte de calor. Tal comportamento estava previsto, uma vez que, em condições controladas, as variações de altitude tendem a ser negligenciáveis em intervalos curtos de tempo e em espaços restritos. A estabilidade dos valores de altitude foi corroborada pelo gráfico ilustrado na Figura 51, o qual evidencia que a proximidade da fonte de calor não exerceu impacto significativo na altitude aferida.

Figura 51- Gráfico de altitude.



Fonte: (AUTOR, 2024).

4.5 Monóxido de Carbono

A concentração máxima de monóxido de carbono (CO) captada no ambiente confinado simulado em uma caixa de vidro foi de 1109 ppm. Durante o experimento em ambiente confinado, para simular as condições de liberação de gás através de uma queima incompleta em um ambiente de mina subterrânea sem o auxílio de ventilação, a concentração interna de monóxido de carbono cresceu de maneira substancial.

Figura 52– Experimento para captação de concentração de gases em ambiente confinado.



Fonte: (AUTOR, 2024).

O gráfico gerado e ilustrado pela Figura 53 evidenciou uma curva descendente da concentração de CO durante o desconfinamento do ambiente. A diminuição da concentração de CO foi atribuída à retirada da caixa de vidro, contribuindo para a renovação de ar do ambiente confinado, dispersando os gases gerados pela combustão. Após a completa renovação do ar, a concentração de CO caiu rapidamente, retornando ao estado inicial.

Figura 53- Gráfico de concentração de monóxido de carbono.

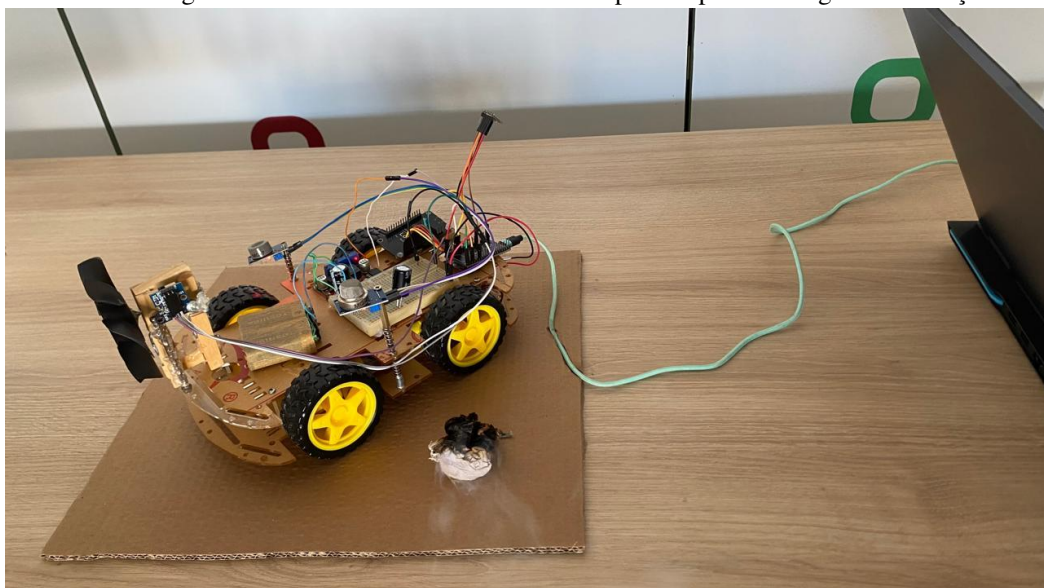


Fonte: (AUTOR, 2024).

4.6 Metano, Butano, GLP e/ou Fumaça

A concentração de gases como metano, butano, GLP e/ou fumaça foi registrada em até 100 ppm. Durante o experimento, foi captada a concentração de gás liberada por um isqueiro no ambiente confinado. Observou-se uma variação de medição gradual na detecção desses gases pelo sensor, atingindo um aumento progressivo a partir da liberação do gás. A diminuição está associada ao desconfinamento da caixa de vidro, que libera os gases do ambiente confinado, impactando as medições. Após a remoção da caixa, a concentração dos gases entrou em declínio, estabilizando à medida que o ar retornava às condições normais do ambiente.

Figura 54- Desconfinamento do ambiente para dispersão dos gases e fumaça.



Fonte: (AUTOR, 2024).

O gráfico demonstrado na Figura 55 apresentou uma curva aproximadamente linear durante o período do experimento, seguida por uma queda gradual durante a liberação do ar viciado do ambiente simulado, devido ao vazamento de gás após ausência de vedação completa no experimento.

Figura 55- Gráfico de concentração de combustíveis e fumaça.

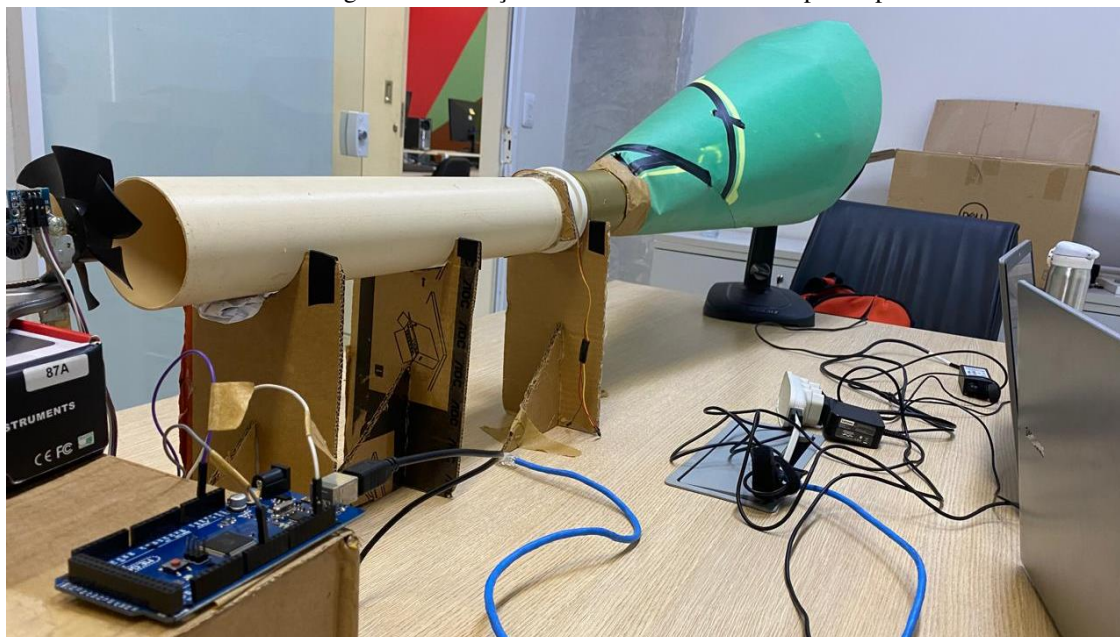


Fonte: (AUTOR, 2024).

4.7 Túnel de vento

Para a coleta de dados, tanto com o anemômetro digital, como também, com o protótipo de anemômetro, foi desenvolvido um túnel de vento composto por cano PVC, cartolina e fita, ilustrado na Figura 56, objetivando canalizar a ventilação em uma única direção e que a variação do fluxo de ar fosse a mínima possível, minimizando interferências externas. Antes da medição, era assegurado um tempo de 2 minutos para a estabilização do sistema. Assim, foram medidas as três velocidades do fluxo de ar do ventilador, com o anemômetro profissional da marca Wintact, modelo WT87A (Figura 57), na sequência (mínima, média e máxima) e armazenados em forma de tabelas, com os resultados obtidos em metros por segundo. Por conseguinte, o mesmo procedimento foi realizado com o protótipo de anemômetro, sendo os dados armazenados em forma de tabela com os resultados expressos em RPM. Com todos os dados armazenados, foi executada a correlação entre RPM, medido pelo protótipo em ESP8266, e a velocidade do ar medida, pelo anemômetro profissional, para converter os valores gerados pelo protótipo de RPM para metros por segundo, representado pelo gráfico da Figura 58.

Figura 56- Medição no túnel de vento com o protótipo.



Fonte: (AUTOR, 2023).

Para a escolha dos dados, inicialmente obteve-se 100 medições para cada uma das velocidades e, a partir disso, 20 destes foram selecionados aleatoriamente, também para cada velocidade e posteriormente realizada a curadoria dos resultados.

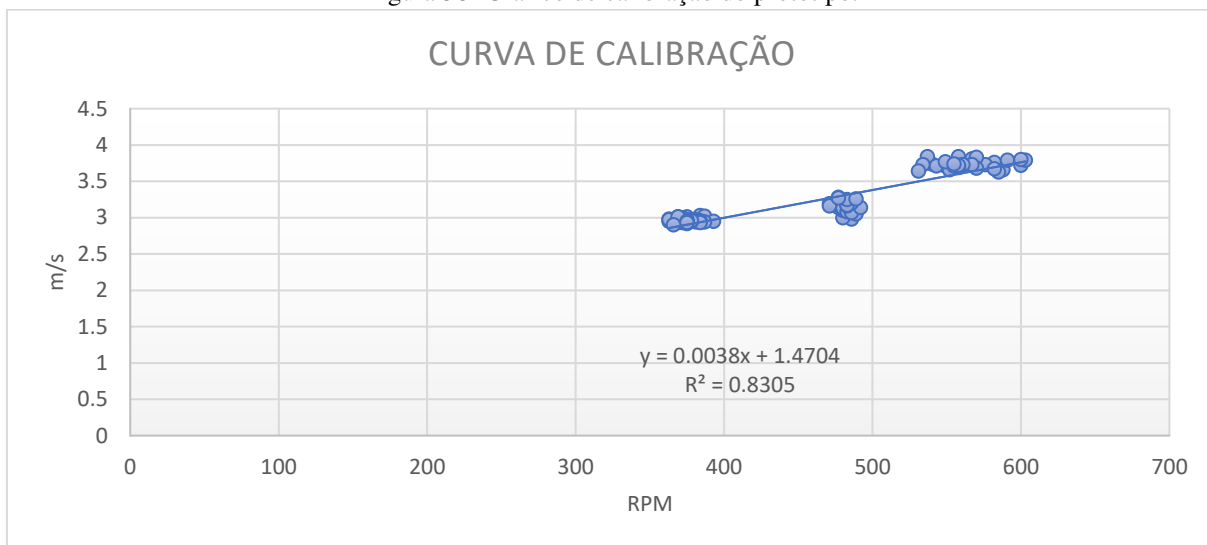
Figura 57- Medição no túnel de vento com o anemômetro profissional.



Fonte: (AUTOR, 2023).

Com os dados tabelados, gerou-se um gráfico com os valores médios das respectivas velocidades, com o intuito de formar uma função linear, que transforma os valores de RPM em metros por segundo. Esta foi inserida no código de programação onde o valor de “x” da função corresponde aos valores de RPM gerados pelo protótipo. Logo, os valores serão convertidos para metros por segundo automaticamente assim que coletados e em seguida incrementados na função linear do código.

Figura 58- Gráfico de calibração do protótipo.



Fonte: (AUTOR, 2023).

Foi estabelecida uma equação linear objetivando converter RPM para m/s, a partir dos dados experimentados. Desta forma, se obteve a seguinte equação:

$$\text{Vel.ar(m/s)} = 0.0038x(\text{RPM}) + 1.4704 \quad (14)$$

Verificou-se uma dispersão das medições das rotações por minuto RPM. Atribui-se possivelmente às seguintes causas: imprecisão do fluxo de ar gerado pelo ventilador; turbulência do ar ao se deslocar no “túnel de vento”; adaptação de uma hélice de cooler para a construção do protótipo; atrito no eixo de rotação da hélice no protótipo.

Entretanto, diante do exposto, verificou-se que foi possível a construção do protótipo. Este conseguiu medir temperatura e umidade do ar, pressão atmosférica, altitude, concentração de gases como CO, Butano, Metano, GLP e/ou fumaça, e a velocidade do fluxo do ar, enviando estes dados (coletados e informados em tempo real) em formato de tabela e gráfico, quando o protótipo se encontrava conectado à internet via Wifi. Assim como, o computador que recebe

os dados do servidor. Estas informações poderiam ser úteis para a utilização de um sistema de ventilação sob demanda, onde se garantiria o fluxo de ar, naquele ambiente de medição, em níveis seguros, para os trabalhadores, e que venham a reduzir custos relacionados ao consumo de energia elétrica deste sistema.

Como próximos passos para futuros trabalhos, indica-se a geração da curva de calibração para os sensores de temperatura e umidade do ar, pressão atmosférica e concentração de gases como CO, Butano, Metano, GLP e/ou fumaça. Também deve-se providenciar a melhoria na construção do protótipo, no que diz respeito à medida da velocidade do fluxo de ar, como utilização de uma hélice mais apropriada, melhor instalada e redução do atrito no eixo de rotação. No geral, o protótipo equipado com o sensor BME280 mostrou-se uma solução possível e adaptável para o monitoramento contínuo das condições ambientais em minas subterrâneas, contribuindo para a segurança e a conformidade com as normativas regulamentadoras.

5 CONCLUSÃO

Os testes realizados com o sensor BME280 demonstraram sua precisão na medição da temperatura e umidade relativa do ar. Durante o experimento, a temperatura medida variou de 20,51°C a 82,79°C dada pela proximidade de uma fonte de calor, enquanto a umidade caiu de 39,084 % para 1,06 %, evidenciando a capacidade do sensor em detectar mudanças ambientais com precisão centesimal. A pressão atmosférica manteve-se constante em 972,364 Pa ao longo do experimento, demonstrando estabilidade em curtos períodos e condições controladas.

O estudo foi conduzido a 350 metros acima do nível do mar, e a altitude permaneceu essencialmente inalterada, mesmo com a proximidade de uma fonte de calor. Esse comportamento era esperado, pois variações de altitude em ambientes controlados tendem a ser insignificantes.

No ambiente confinado simulado, a concentração de monóxido de carbono (CO) atingiu um pico de 1109 ppm devido à queima de papel. Após a ventilação do ambiente, os níveis retornaram rapidamente ao normal. Outros gases, como metano, butano, GLP e fumaça, registraram valores de até 100 ppm, aumentando gradualmente com a liberação de gás e diminuindo após a remoção da vedação da caixa experimental.

O protótipo desenvolvido demonstrou eficácia na conversão dos valores de RPM em metros por segundo, permitindo a medição direta da velocidade do ar. A equação gerada foi implementada no código do ESP8266 para conversão em tempo real. Apesar das perdas de eficiência devido ao uso de componentes reciclados, o sistema mostrou-se adequado para monitoramento da qualidade do fluxo de ar em ambientes subterrâneos.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE COSTA, José César de. **ESTUDOS PARA IMPLANTAÇÃO DE UM MODELO DE VENTILAÇÃO SOB DEMANDA NO COMPLEXO MINEIRO DE IPUEIRA – FERBASA, MUNICÍPIO DE ANDORINHA - BAHIA**. 2017. 1 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, [S. l.], 2017.
- ALMEIDA, SIDARTA GAUTAMA DE. **Estudo de viabilidade técnica e econômica para a implantação de um sistema híbrido de geração de energia elétrica no Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Roraima – Campus Amajari**. 2019. Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado (Engenharia de Produção) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, [S. l.], 2019.
- SILVA, João Paulo Oliveira. **Análise via simulação da ventilação em mina subterrânea – estudo de caso Mina Córrego do Sítio I**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.
- ATLAS COPCO ROCK DRILLS AB (org.). **Mining Methods in Underground Mining**. Suécia: Mike Smith and Patrik Johansson, 2007. 137 p. v. 2.
- AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS NA MINERAÇÃO EM SUBSOLO. Norma Regulamentadora nº 22, de 29 de novembro de 2018. Portaria SIT nº 787. 22.24 Ventilação em Atividades Subterrâneas, [S. l.], 8 jul. 1978. Acesso em: 22 nov. 2022.
- BARROS, Wagner B. **Sistema de Automação Veicular com Arduino e Andróid**. 2012. 58f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Sistemas para Internet) - Centro Universitário Adventista de São Paulo, São Paulo, 2012.
- BRASIL. Ministério da Economia. **NR-15: Atividades e operações insalubres**. Diário Oficial da União, Brasília, 18 dez. 2019. Seção 1. Disponível em: Norma Regulamentadora No. 15 (NR-15) — Ministério do Trabalho e Emprego. Acesso em: 10 de set. 2024.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR-22: Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração**. Diário Oficial da União, Brasília, 17 jul. 2018. Seção 1. Disponível em: Norma Regulamentadora No. 22 (NR-22) — Ministério do Trabalho e Emprego. Acesso em: 10 de set. 2024.
- CARDOSO, Matheus. **Capítulo estudantil de robótica e automação: O que é um microcontrolador?** [S. l.], 23 set. 2020. Disponível em: <https://edu.ieee.org/br-ufcgras/o-que-e-um-microcontrolador/>. Acesso em: 25 set. 2022.
- COSTA, Ennio Cruz da. **Ventilação**. São Paulo: [s. n.], 2005. 256 p.

CURI, Adilson. **LAVRA DE MINAS**. São Paulo: Oficina de textos, julho 2017. 462 p.

DARLING, PETER (ed.). **SME MINING ENGINEERING HANDBOOK**. THIRD EDITION. ed. [S. l.: s. n.], 2011. 1846 p.

DE LA VERGNE, J. **Hard Rock Miner's Handbook**. McIntosh, 2014. 330p.

DIAS, Elizabeth Costa et al. **Atenção à saúde dos trabalhadores expostos à poeira de sílica e portadores de silicose, pelas equipes da atenção básica/saúde da família: protocolo de cuidado**. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2017.

ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32: ESP-IDF programming guide**. Release v4.4.2. [S. l.], 2 ago. 2022. Disponível em: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/esp-idf-en-v4.4.2-esp32.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2022.

EUROPEAN COMMISSION. **Industry 5.0: Human-Centric, Sustainable and Resilient**. European Commission, Directorate-General for Research and Innovation: Luxembourg, 2021.

AGÊNCIA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DOS ESTADOS UNIDOS (EPA). **Health assessment document for diesel engine exhaust**. Washington, DC: EPA, 2002.

EUROPEAN COMMISSION. **Industry 5.0: Towards a Sustainable, Human-Centric and Resilient European Industry**; European Commission, Directorate-General for Research and Innovation: Luxembourg, 2021.

FRANCESCHI, Alessandro de. **Ergonomia**. Santa Maria - RS: [s. n.], 2013. 1-135 p. ISBN 978-85-63573-37-7.

GERMANY, Darcy José. **A mineração no Brasil**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2002.

GONÇALVES, Hugo Alexandre Garcia. **A Internet das Coisas na Mineração**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Minas, Belo Horizonte, 2018.

HARTMAN, H. L. **Mine ventilation and air conditioning**. USA: Wiley-Interscience Publication, 1991. 721p.

HARTMAN, Howard L. ; MUTMANSKY, Jan M. **INTRODUCTORY MINING ENGINEERING**. SECOND EDITION. ed. atual. [S. l.]: Pushp Print Services, 2002. 1-529 p.

KAROLY, C. K. **New ventilation design criteria for underground metal mines based upon the "life-cycle" airflow demand schedule**. The University Of British Columbia (Vancouver). August 2009.

LISBOA, Fernando Moacyr. **Mineração: uma experiência vivida**. Belo Horizonte: [s. n.], 2009. 257 p.

Macêdo, A. J. B.; Bazante, A. J.; Bonates, E. J. L. Seleção do método de lavra: arte e ciência. REM - Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 54, n. 3, p. 221-225, jul./set. 2001.

MATTOS, Alessandro Nicoli de. **Telemetria e conceitos relacionados**: Uma visão geral dos sistemas de telemetria com ênfase em aplicações aeroespaciais. São Paulo: [s. n.], 2004. 382 p.

MCPHERSON, Malcom J. **Subsurface Ventilation Engineering book**: Chairman, Mine Ventilation Services, Incorporated. HINSLEY, Frederick Baden (ed.). Inglaterra: [s. n.], 2008. 834 p.

ESTADOS UNIDOS. Department of Labor. Mine Safety and Health Administration (MSHA). **Diesel Particulate Matter Exposure of Underground Metal and Nonmetal Miners**. Federal Register, v. 73, n. 144, p. 42580-42620, 25 jul. 2008.

NAHAVANDI, S. Industry 5.0—A Human-Centric Solution. Sustainability. 2019; 11(16):4371. <https://doi.org/10.3390/su11164371>

NISA (Washington, DC). **Occupational Health Program for Exposure to Crystalline Silica in the Industrial Sand Industry**. 2º. ed. atual. [S. l.: s. n.], 2010.

Özdemir, V., Hekim, N. Birth of Industry 5.0: Making Sense of Big Data with Artificial Intelligence, "the Internet of Things" and Next-Generation Technology Policy, 2018.

PAYNE T.; MITRA, R. A review of heat issues in underground metalliferous mines. 12th Ed. 2008.

PENIDO, Édilu C. C; TRINDADE, Ronaldo S. **Microcontroladores**. Ouro Preto: MEC, 2013.

PETROBRÁS. **Ficha de informação de segurança de produto químico (FISPQ)**: óleo diesel marítimo. Rio de Janeiro, 2010.

Pinto, Paul Cézanne. (2006), "**Avaliação das condições ambientais na mineração em subsolo**." Rem: Revista Escola de Minas, Vol. 59, núm.3, pp.311-316 [Consultado: 24 de junho de 2023]. ISSN: 0370-4467. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rem/a/YSxCWRJkTgZrtnM3bgdpkTc/?format=pdf&lang=pt>

QUEIROZ, Wagner Rodrigues de Oliveira; SOUSA, Wanderson Quaresma de. **A IMPORTÂNCIA DA PLATAFORMA ARDUINO NO MEIO ACADÊMICO**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento., [S. l.], p. 1-23, 1 ago. 2018. Acesso em: 28 de set. 2022.

SAMPAIO, C. A. de P.; ULLMANN, M. N.; CAMARGO, M. **DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE ANEMÔMETRO DE COPOS DE FÁCIL CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO**. Revista de Ciências Agroveterinárias, Lages, v. 4, n. 1, p. 11-16, 2014.

SANTOS, Diego Aparecido Monteiro; SILVA, Frans Walker Rocha; MACHADO, Jefferson: **TELEMETRIA AUTOMOTIVA E SUAS APLICAÇÕES DA PREDITIVA**. Anais do 3º Simpósio de TCC, das faculdades FINOM e Tecsoma. 2020; 1052-1074.

SILVA, Bruna Cristina Ramos *et al.* **TELEMETRIA: um estudo sobre a gestão de informações como fator de vantagem competitiva no Grupo JCA**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Especialização em Gestão de Negócios.) - FUNDAÇÃO DOM CABRAL, São Paulo, 2019.

SILVA, J. M. **Lavra subterrânea. Notas e apostilas de aula**. Graduação em Engenharia de Minas. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, 2005.

SILVA, Robson Marinho da; FILHO, Diolino J. Santos; MIYAGI, Paulo E. **MODELAGEM DE SISTEMA DE CONTROLE DA INDÚSTRIA 4.0 BASEADA EM HOLON, AGENTE, REDE DE PETRI E ARQUITETURA ORIENTADA A SERVIÇOS**. **CNPq, Fapesp e Capes.**, São Paulo, p. 2-6, 4 ago. 2015.

SOUZA, M. A.; LIMA, R. P. **Mecanismos de termorregulação do corpo humano**. *Revista Brasileira de Fisiologia*, São Paulo, v. 15, n. 2, p. 123-135, abr. 2020.

SYSTEMS, Espressif. ESP8266EX: Datasheet. **Specifications Of ESP8266EX**, [S. l.], ano 2023, n. Version 7.0, p. 1-32, 14 ago. 2024.

TANENBAUM, A. S. **Redes de computadores**. 4. Ed. Rio de Janeiro: Campus, Elsevier, 2003. 945 p. Tradução de Vandenberg D. de Souza.

TATIYA, Ratan Raj. **Surface and underground excavations: methods, techniques and equipment**. London: A. A. Balkema, 2005. 597 p.

TECHNICAL Reference Manual: **ESP32**. [S. l.], 2022. *E-book* (732 p.).

TORRES, Vidal Félix Navarro; DA GAMA, Carlos Dinis. **ENGENHARIA AMBIENTAL SUBTERRÂNEA E APLICAÇÕES**. Rio de Janeiro: Roberto C. Villas-Boas, maio 2005. 531 p.

VALENTE, M. S. **Fundamentos da termodinâmica**. Escola de Engenharia Industrial de São José dos Campos. 2005.

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

XIA, Feng; YANG, Laurence T; WANG, Lizhe; VINEL, Alexey. **Internet of Things. IOT**, **INTERNATIONAL JOURNAL OF COMMUNICATION SYSTEMS**, p. 2-10, 10 fev. 2012.