



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS DE CRATEÚS**  
**CURSO DE ENGENHARIA DE MINAS**

**ANTONIO WESLEY DE SOUSA COSTA**

**PROTOTIPAGEM DE SEMÁFORO DE MINA SUBTERRÂNEA EM PLATAFORMA**  
**ARDUINO**

**CRATEÚS-CE**

**2023**

ANTONIO WESLEY DE SOUSA COSTA

**PROTOTIPAGEM DE SEMÁFORO DE MINA SUBTERRÂNEA EM PLATAFORMA  
ARDUINO**

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal do Ceará, Campus Crateús, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas.

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

Coorientador: Prof. Dr. Jose Wellington Franco da Silva.

CRATEÚS-CE

2023

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)

---

- C87p Costa, Antonio Wesley De Sousa.  
Prototipagem de semáforo de mina subterrânea em plataforma arduino / Antonio Wesley De Sousa Costa. – 2023.  
56 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia de Minas, Crateús, 2023.  
Orientação: Prof. Me. Emanuel Itaquê de Negreiros Moreira.  
Coorientação: Prof. Dr. Jose Wellington Franco da Silva.
1. Mina subterrânea. 2. Arduino. 3. Sistema de semáforo. I. Título.

CDD 622

---

ANTONIO WESLEY DE SOUSA COSTA

PROTOTIPAGEM DE SEMÁFORO DE MINA SUBTERRÂNEA EM PLATAFORMA  
ARDUINO

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado  
ao Curso de Engenharia de Minas da  
Universidade Federal do Ceará, Campus  
Crateús, como requisito parcial para obtenção  
do título de bacharel em Engenharia de Minas.

Aprovada em: xx/xx/xxxx.

BANCA EXAMINADORA

---

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

---

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

---

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

---

Prof. Dr. Marinésio Pinheiro de Lima  
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

A Deus.

Aos meus pais, Gleison e Zilma.

## **AGRADECIMENTOS**

À Instituição Universidade Federal do Ceará e todo seu corpo docente e seus colaboradores.

Aos professores Emanuel Itaquê e José Wellington pelo apoio na realização desta pesquisa e orientação. Ao discente Mikael Sales pelo apoio na realização do projeto.

Aos professores participantes da banca examinadora pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos meus colegas de graduação pela convivência durante os últimos anos.

A toda minha família, pelo apoio durante toda minha trajetória.

“Não sabendo que era impossível, foi lá e fez!”  
(Jean Cocteau).

## RESUMO

As operações de carregamento e transporte representam grande parte dos custos de produção em minas subterrâneas. Alguns dos fatores que contribuem para estes custos estão relacionados ao Fluxo de veículo controlado por um sistema de semáforos: quando o operador necessitar informar ao sistema de maneira manual que este irá trafegar por determinado trecho da mina; ao número de *passing bays* e os locais que estes foram construídos. Em vista disto, se mostra interessante a busca de soluções tecnológicas por meio de *softwares* que possam auxiliar nas tomadas de decisões, acionando os semáforos de forma automática na passagem dos veículos e, assim, aumentar a eficiência do processo para reduzir os custos operacionais e elevar a segurança nesta operação. Desta forma, este trabalho tem por objetivo desenvolver um protótipo com a utilização do Arduino Uno, de baixo custo e de fácil implantação para realizar a automação do sistema de semáforo em minas subterrâneas de mão única. Para tanto, foi feito um planejamento no software *tinkercad*, de forma que se fez possível inferir de maneira prévia o funcionamento do Arduino Uno em conjunto com os sensores. Foi realizada a seleção dos materiais que foram utilizados para construção da maquete para simular o tráfego de veículos em minas subterrâneas de mão única e para automação do sistema de sistema de semáforo. As análises experimentais foram validadas na execução do protótipo feito em escala piloto, de forma que este se apresentou funcional, controlando o tráfego através do circuito de semáforos adotado.

**Palavras-chave:** Mina subterrânea; Arduino; Sistema de semáforo.

## ABSTRACT

Loading and transportation operations represent a large part of production costs in underground mines. Some of the factors that contribute to these costs are related to the traffic light system: when the operator needs to manually inform the system that it will travel through a certain section of the mine; to the number of passing bays and the places where they were built. In view of this, it is interesting to search for technological solutions through software that can assist in decision making and, thus, increase the efficiency of the process to reduce operational costs. Therefore, this work aims to develop a prototype using the Arduino Uno, low cost and easy to implement, to automate the traffic light system in one-way underground mines. To this end, planning was carried out using the tinkercad software, so that it was possible to infer in advance how the Arduino Uno would work in conjunction with the sensors. The selection of materials that were used to build the model was carried out to simulate vehicle traffic in one-way underground mines and to automate the traffic light system system. The experimental analyzes were validated in the execution of the prototype made on a pilot scale, so that it was functional, controlling traffic through the adopted traffic light circuit.

**Keywords:** Underground mine; Arduino Uno; Traffic light system.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Fluxograma métodos de acesso em minas subterrâneas.....  | 18 |
| Figura 2 - (a) corpo horizontal acessado por poço vertical. (b) Acesso a corpos inclinados utilizando poço inclinado.....   | 19 |
| Figura 3 - Exemplo de rampas em mineração subterrânea.....  | 19 |
| Figura 4 - Galeria de transporte na mina de Passagem, em Mariana (MG).....  | 20 |
| Figura 5 -Classificação dos métodos de lavra subterrânea de acordo com a sua estabilidade...21  |    |
| Figura 6 - Arranjo típico da lavra por câmaras e pilares.....   | 22 |
| Figura 7 - Arranjo típico da lavra de alargamento em subníveis.....   | 23 |
| Figura 8 - Recalque ( <i>Shrinkage Stopping</i> ).....  | 24 |
| Figura 9 - Arranjo Típico da lavra por corte e enchimento.....  | 25 |
| Figura 10 - Abatimento em Subníveis ( <i>Sublevel Caving</i> ).....   | 26 |
| Figura 11 - Representação esquemática de uma mina de caverna de blocos típicos.....   | 27 |
| Figura 12 – Representação das operações do método de mineração de carvão longwa.....  | 28 |
| Figura 13 - Visão lateral do Jumbo e seus componentes.....  | 30 |
| Figura 14 - LHD movida à diesel.....  | 31 |
| Figura 15 - Caminhão Articulado Subterrâneo AD30 - Caterpillar.....   | 31 |
| Figura 16 - Equipamento tipo Scaler em operação.....  | 32 |
| Figura 17 - Baía de Passagem ( <i>Passing Bay</i> ).....  | 33 |
| Figura 18 - Vista da placa do Arduino UNO Rev 3 (frente e verso).....   | 34 |
| Figura 19 - (a) Iniciando a IDE do Arduino no Windows 10. (b)Sketch aberta com o código “AnalogWriteMega”, exemplo contido no IDE.....  | 34 |
| Figura 20 - Ambiente Tinkercad.....   | 36 |
| Figura 21 - Representação do sistema de semáforo em minas subterrânea de "mão única”.....   | 39 |
| Figura 22 - Esquematização das etapas do projeto.....   | 42 |
| Figura 23 - (a) Projeto de automação dos semáforos em escala piloto no Tinkercad. (b)Planta elétrica do projeto de automação dos semáforos em escala piloto no Tinkercad..... | 43 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 24 - Planta baixa protótipo.....          | 45 |
| Figura 25 - Maquete completa.....                | 45 |
| Figura 26 - Trecho 1 saída da mina.....          | 46 |
| Figura 27 - Trecho 1 entrada da mina.....        | 47 |
| Figura 28 - Trecho 2 saída da mina.....          | 47 |
| Figura 29 - Trecho 2 entrada da mina.....        | 48 |
| Figura 30 - Trecho 3 saída da mina.....          | 48 |
| Figura 31 - Trecho 3 entrada da mina.....        | 49 |
| Figura 32 - Trecho 4 saída da mina.....          | 49 |
| Figura 33 – Trecho 4 entrada da mina.....        | 50 |
| Figura 34 - Trechos sem trânsito.....            | 50 |
| Figura 35 - Veículos em sentidos contrários..... | 51 |

## **LISTA DE TABELAS**

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Comparativo entre os métodos de lavra subterrânea.....                       | 28 |
| Tabela 2 – Materiais utilizados na construção do protótipo proposto neste trabalho..... | 40 |

## Sumário

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | <b>INTRODUÇÃO</b>  | 14 |
| 2     | <b>JUSTIFICATIVA</b>   | 15 |
| 3     | <b>OBJETIVOS</b>   | 16 |
| 3.1   | <b>Objetivo Geral</b>  | 16 |
| 3.2   | <b>Objetivos Específicos</b>   | 16 |
| 4     | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>   | 17 |
| 4.1   | <b>Lavra subterrânea</b>   | 17 |
| 4.1.1 | Vantagens e Desvantagens mina subterrânea  | 17 |
| 4.2   | <b>Métodos de acesso em minas subterrâneas</b>                                   | 18 |
| 4.2.1 | Poços  | 18 |
| 4.2.2 | Rampas   | 19 |
| 4.2.3 | Galerias   | 20 |
| 4.2.4 | Chaminés   | 20 |
| 4.3   | <b>Métodos de lavra em minas subterrâneas</b>                                    | 21 |
| 4.3.1 | Métodos de lavra com realces autoportantes                                       | 21 |
| 4.3.2 | Métodos de lavra com suporte das encaixantes                                     | 23 |
| 4.3.3 | Métodos de lavra por abatimento  | 26 |
| 4.3.4 | Comparação entre os métodos de lavra subterrânea                                 | 28 |
| 4.4   | <b>Etapas do desenvolvimento e equipamentos utilizados em minas subterrâneas</b> | 29 |
| 4.4.1 | Carregamento de explosivos   | 30 |
| 4.4.2 | Carregamento e transporte de material  | 30 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 4.4.3 | Condicionamento  | 31 |
| 4.5   | <b>Transporte em galerias utilizando rampas</b>  | 32 |
| 4.6   | <b>Arduino</b>   | 33 |
| 4.6.1 | Sensores   | 35 |
| 4.6.2 | Atuadores  | 35 |
| 4.7   | Tinkercad  | 35 |
| 5     | <b>TRABALHOS RELACIONADOS</b>  | 37 |
| 5.1   | <b>Desenvolvimento de um Semáforo Inteligente Utilizando Arduino e Sensores Infravermelhos</b> | 37 |
| 5.2   | <b>Prototipagem de estacionamento inteligente com comunicação sem fio</b>                      | 37 |
| 6     | <b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>   | 39 |
| 6.1   | <b>Planejamento</b>  | 40 |
| 6.2   | <b>Desenvolvimento do protótipo</b>  | 40 |
| 6.3   | <b>Análise da funcionalidade do sistema</b>  | 42 |
| 7     | <b>RESULTADOS</b>  | 43 |
| 7.1   | <b>Circuito planejado em <i>Tinkercad</i></b>  | 43 |
| 7.2   | <b>Construção da maquete</b>   | 44 |
| 7.3   | <b>Lógica de programação de Arduino utilizada</b>  | 45 |
| 7.4   | <b>Validação do protótipo</b>  | 46 |
| 8     | <b>CONCLUSÃO</b>   | 52 |
| 9     | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>  | 53 |

## 1 INTRODUÇÃO

A sociedade moderna depende, direta ou indiretamente, dos recursos minerais aplicados em diversos setores da indústria, desde a geração de energia até a construção civil. A exploração industrial desses recursos implica em um conjunto de operações coordenadas visando a extração eficiente, segura e sustentável da jazida. Deste ponto de vista, a mineração pode ocorrer acima ou abaixo do solo. É classificada como atividade a céu aberto ou subterrânea (HARTMAN; MUTMANSKY, 2002). A mineração é atividade dispendiosa e os retornos financeiros são incertos, tornando-se um negócio arriscado.

A mineração subterrânea é a extração e o transporte de um recurso mineral de seu local subterrâneo de escavação para uma usina ou planta de tratamento na superfície ou pilha de estéril (ALFORD, 2007). As minas subterrâneas, de acordo com SAAYMAN (2005), focam-se na automatização dos veículos, pois suas operações ocorrem em ambiente insalubre e devido a isso impossibilita o sensoriamento remoto dos veículos, ao passo que nas minas a céu aberto houveram mudanças nas últimas décadas, ocasionando a implementação de sistemas computadorizados de gerenciamento em tempo real. O transporte em minas subterrâneas realizado através de rampas de “*mão única*” é frequentemente sinalizado por semáforos acionados manualmente pelos operadores dos equipamentos de transporte que perdem tempo na execução desta tarefa e se expõem a sinistros na realização dessa atividade.

O objetivo deste trabalho é melhorar a eficiência do transporte de pessoas e materiais em uma mina subterrânea através de controle autônomo, na tentativa de reduzir o tempo de tráfego nesta operação. Consiste no desenvolvimento de um protótipo que irá controlar um sistema de semáforos em uma maquete. Esta simulará um sistema de rampas de acesso de tráfego de via única em uma mina subterrânea. Com este trabalho pretende-se gerar alternativas de projetos para estes tipos de sistema que funcione em um ambiente real de mina subterrânea, aumentando a produtividade e tornando mais seguro o transporte de pessoas e minério em uma mina subterrânea.

## 2 JUSTIFICATIVA

Sabe-se que variações nos tempos de ciclo de um sistema de despacho de uma mineração subterrânea impactam em sua produtividade, de forma que sempre se buscam tempos de ciclo menores. Porém, estas operações sempre devem ocorrer de forma segura, onde, por exemplo, o tráfego de equipamentos de transporte sobre pneus não ocorra de forma indevida, com velocidades excessivas, que ponha em risco de acidentes operadores, pessoas e equipamentos que por ali transitam.

Sabe-se que um sistema de semáforo também é importante aliado na economia do tráfego de veículos em minas subterrâneas, principalmente pelo fato de que quanto mais faixas de tráfego forem construídas, maiores serão os custos de desenvolvimento das galerias de acesso, pois estas irão necessitar de uma maior área de seção transversal.

Desta forma, um sistema de semáforo autônomo e de baixo custo em minas subterrâneas se mostra uma ferramenta importante para a eficiência destas operações, excluindo a necessidade de o operador informar ao sistema, de maneira manual, que este irá trafegar por determinado trecho da mina, melhorando, assim, esta etapa do processo, gerando economia de tempo e otimizando este tempo de ciclo.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo Geral**

Construir protótipo de sistema, com a utilização do Arduino uno, que seja útil para o controle do tráfego de veículos em acessos de minas subterrâneas.

#### **3.2 Objetivos Específicos**

- Manipular softwares específicos para planejamento da construção do protótipo em Arduino;
- Construir maquete que simula acessos de mina subterrânea;
- Utilizar sensores e atuadores específicos para detecção e controle do tráfego de veículos em minas subterrâneas, em escala piloto.

## **4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Neste capítulo, será apresentado o referencial teórico deste trabalho, que está disposto em sete tópicos, dos quais se discutirá sobre o desenvolvimento de mina subterrânea, se apresentarão as principais formas de acesso ao corpo e retirada do minério, características de cada uma delas e se contextualizará sobre o Arduino, seu simulador e suas aplicações.

### **4.1 Lavra subterrânea**

Conforme Hartman e Mutmansky (2002) lavras subterrâneas são todas as operações de extração de minério feitas abaixo da superfície terrestre. De acordo com Oliveira (2012) maciços rochosos na maioria das vezes, apresentam-se descontínuos, heterogêneos, anisotrópicos e regidos por um comportamento mecânico intrínseco, fazendo da estabilidade de uma escavação subterrânea um dos principais desafios para a engenharia de minas.

Apesar das dificuldades encontradas na exploração de minas subterrâneas, as perspectivas são de aumento em processar bens minerais através desse tipo de lavra, em consequência da progressiva exaustão das reservas facilmente lavráveis a céu aberto, além do que, há a necessidade de preservação do meio ambiente, impondo cada vez mais restrições à mineração a céu aberto. Existem vários métodos de extração de minérios, esses são chamados métodos de lavra, cada um com um conjunto complexo de características. (BRIGOLINI, 2011).

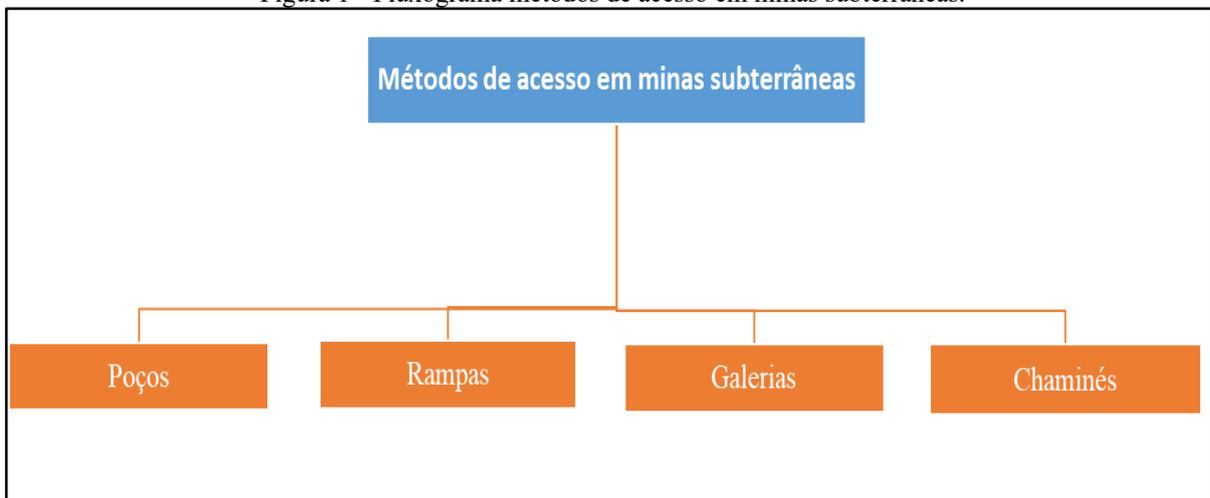
#### **4.1.1 Vantagens e Desvantagens mina subterrânea**

As vantagens desse tipo de mina são: Menor gasto com recuperação do local; O clima e o tempo do local não influenciam na produção; não há necessidade de grandes movimentações de estéril. Em contrapartida, as desvantagens são: maior probabilidade de ocorrer acidentes; elevado investimento na infraestrutura; há um maior gasto de energia elétrica; há limitação no tamanho/dimensionamento das galerias, aumentando as dificuldades operacionais; mão de obra mais especializada. (ALVARENGA,2012).

## 4.2 Métodos de acesso em minas subterrâneas

De acordo com Macêdo *et al* (2001) a lavra subterrânea compreende uma sequência de operações, que passam por perfuração e desmonte de rochas, carregamento e transporte de minério desmontado para posterior beneficiamento e/ou comercialização, além do carregamento e transporte de rocha estéril desmontada. As jazidas lavradas por métodos subterrâneos podem ser acessadas através de poços, rampas, galerias e chaminés. Antes de definir o acesso a ser utilizado, é necessário estudar a implementação de cada um deles em detrimento dos demais (CURI,2017). A figura 1 representa o fluxograma dos métodos de acesso de minas subterrâneas.

Figura 1 - Fluxograma métodos de acesso em minas subterrâneas.

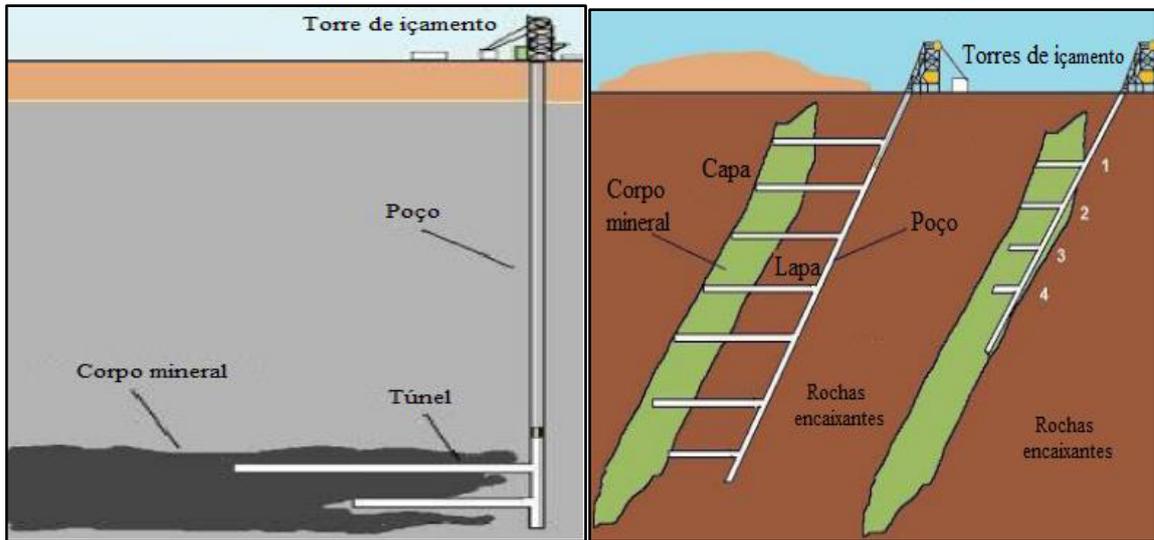


Fonte Autor,2022.

### 4.2.1 Poços

O principal objetivo de um poço em mina subterrânea é fornecer acesso ou permitir o contato da superfície com as instalações subterrâneas. A escavação consiste em uma abertura subterrânea vertical ou inclinada, que pode ser usada para elevar estéril e minérios, transportar pessoas ou materiais e ventilar minas. São recomendados para situações onde o transporte rodoviário não é economicamente viável (HAMRIN, 2001). A Figura 2 mostra dois tipos diferentes de acesso de poços.

Figura 2 – (a) corpo horizontal acessado por poço vertical. (b) Acesso a corpos inclinados utilizando poço inclinado.

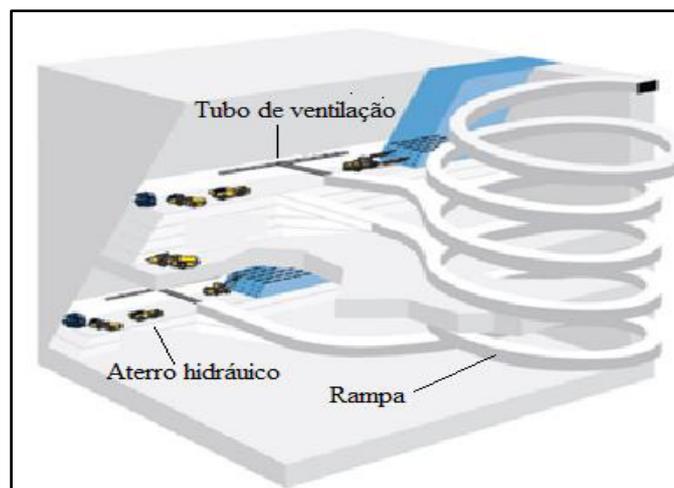


Fonte: Adaptado de Mine-net.Blogspot.com, 2011.

#### 4.2.2 Rampas

As rampas, normalmente são construídas ao redor do corpo de minério e podem ser em espiral ou circular, como representado na Figura 3. Dependendo da qualidade da rocha, se a resistência desta é desfavorável, pode-se suportar a rocha. Conforme Arruda (2011) a inclinação da rampa costuma estar em torno de 14%, o que possibilita a utilização do equipamento sobre pneus, proporcionando um avanço rápido, fácil e seguro.

Figura 3 – Exemplo de rampas em mineração subterrânea.

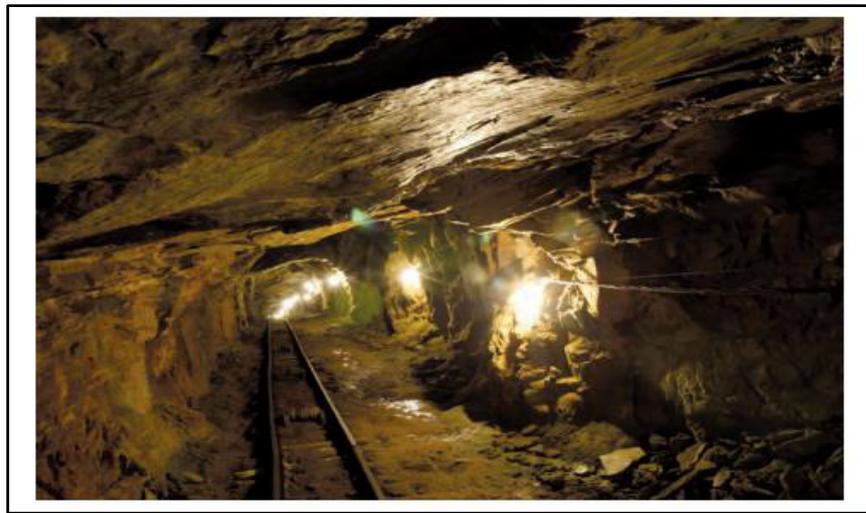


Fonte: Adaptado de Atlas Copco, 2007.

### 4.2.3 Galerias

Conforme Arruda (2011) em uma mina subterrânea, as galerias horizontais são utilizadas para diversos fins: desenvolvimento do sistema de lavra, pesquisa e transporte, entre outros. Dependendo das condições da rocha e da estabilidade necessária, a forma de corte é retangular ou varia de forma arqueada circular. A Figura 4 ilustra uma galeria horizontal, destinada a transporte sobre trilhos

Figura 4 – Galeria de transporte na mina de Passagem, em Mariana (MG).



Fonte: Curi, 2017.

### 4.2.4 Chaminés

As chaminés em minas subterrâneas permitem conexões entre diferentes camadas horizontais, servem como passagens para minério e estéril, para transporte de pessoas, como condutores de ventilação e, em alguns métodos de lavra, para iniciar o desmonte de painéis. A inclinação das chaminés normalmente varia da posição vertical até 55° de angulação com relação a horizontal. Uma inclinação inferior torna complicada a retirada do material do interior da chaminé (ARRUDA, 2011).

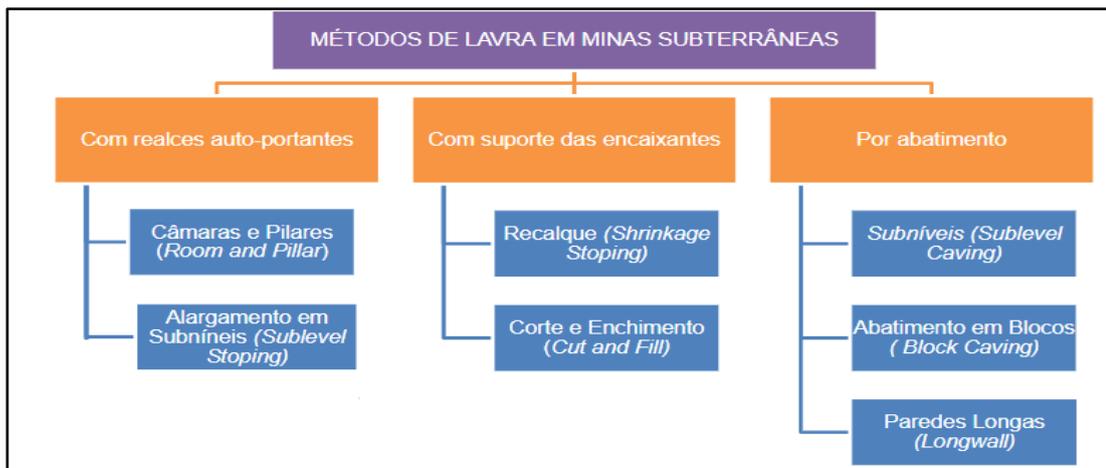
### 4.3 Métodos de lavra em minas subterrâneas

Os métodos de lavra a serem utilizados dependem principalmente da forma e posição espacial do corpo mineral e também do comportamento mecânico do próprio corpo de minério e de suas rochas encaixantes (OLIVEIRA, 2012).

De acordo com Melo (2014) o teor do minério é importante na escolha de um método de lavra. Um teor baixo de minério reflete-se em um método de lavra e processamento de baixo custo, mesmo que isto possa resultar em baixa recuperação do minério. Já um minério com teor elevado possibilita um método de lavra e processamento com máxima recuperação.

Os métodos de lavra subterrânea podem ser divididos em três categorias (figura 5), métodos com realces autoportantes, métodos com suporte das encaixantes e métodos de abatimento, que se baseiam nos tipos de suporte necessários para a execução das operações de lavra.

Figura 5: Classificação dos métodos de lavra subterrânea de acordo com a sua estabilidade.



Fonte: Autor,2022.

#### 4.3.1 Métodos de lavra com realces autoportantes

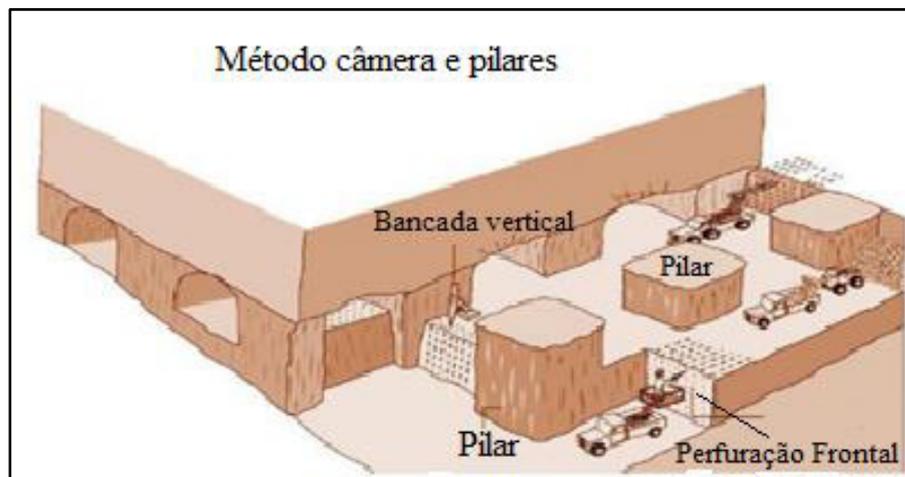
Dentre os métodos com realces autoportantes mais comuns estão os métodos: câmaras e pilares, alargamento em Subníveis. São os métodos mais difundidos no Brasil:

Segundo Germani (2002), via de regra, estes métodos requerem elevada continuidade e homogeneidade da qualidade do minério para sua aplicação e, geralmente, são altamente produtivos, dada a simplicidade das operações combinadas utilizadas.

#### 4.3.1.1 Câmaras e Pilares (*Room and Pillar*)

Em consonância com Souza (2017) a mineração de câmaras e pilares envolve a abertura de uma série de *stopes* ou câmaras com inclinação suave, onde pilares de minério ou estéril são deixados no realce para suportar a pressão vertical. De acordo com Hamrim (2001), como a inclinação da escavação é menor do que a necessária para que a gravidade interrompa o fluxo do material, o minério britado é carregado na câmara e transportado até o ponto de descarga, onde pode ser transportado por gravidade ou mecanicamente, para finalmente chegar ao ponto de descarga de material da mina. A Figura 6 demonstra um esquema de mineração em Câmaras e Pilares.

Figura 6 – Arranjo típico da lavra por Câmaras e Pilares (*Room and Pillar*)



Fonte: Modificado de HAMRIN, 2001.

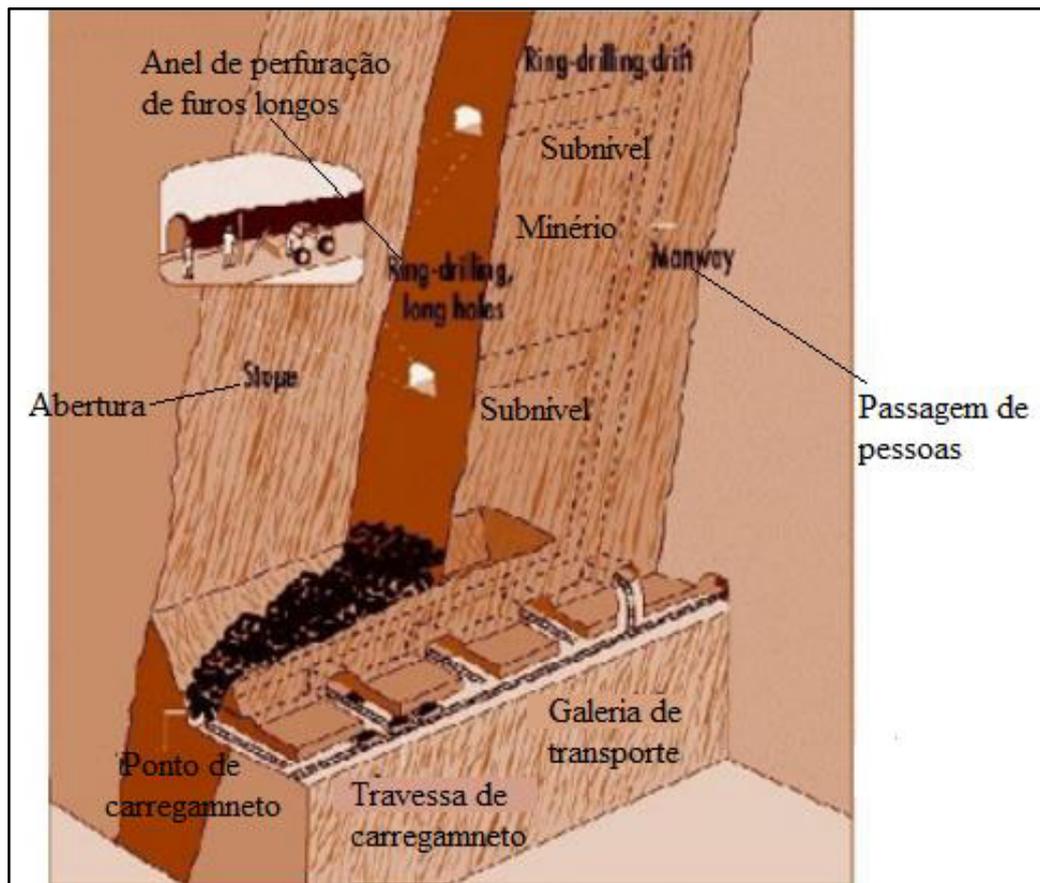
#### 4.3.1.2 Alargamento em Subníveis (*Sublevel Stopping*)

Método de lavra ascendente, em que são desmontadas tiras verticais de minério, de grande volume, escoando o material pelos chutes e travessas de produção. A lavra por realce em subníveis requer que as rochas da capa (*hanging wall*) e da lapa (*footwall*) sejam de

competência alta, visto que não há utilização de suportes nos realces deixados após o desmonte. (SOUZA, 2017)

A Figura 7 ilustra um modelo esquemático de utilização do método de *sublevel stopping*, onde estão representados: a passagem de pessoal (*manway*), ponto de carregamento (*draw point*), travessas de carregamento (*Loading cross-axis*) e galeria de transporte (*transport drifts*).

Figura 7 – Arranjo típico da lavra de Alargamento em Subníveis (*Sublevel Stopping*).



Fonte: Modificado de Hartman, 2002.

#### 4.3.2 Métodos de lavra com suporte das encaixantes

Dentre os métodos mais comuns estão: Recalque (*Shrinkage Stopping*) e Corte e Enchimento (*cut and fill*). Estes são os métodos que requerem quantidades substanciais de suporte artificial para manter a estabilidade na exploração de aberturas, e controle de solo sistemático em toda a mina. Os métodos suportados são usados quando as aberturas de produção

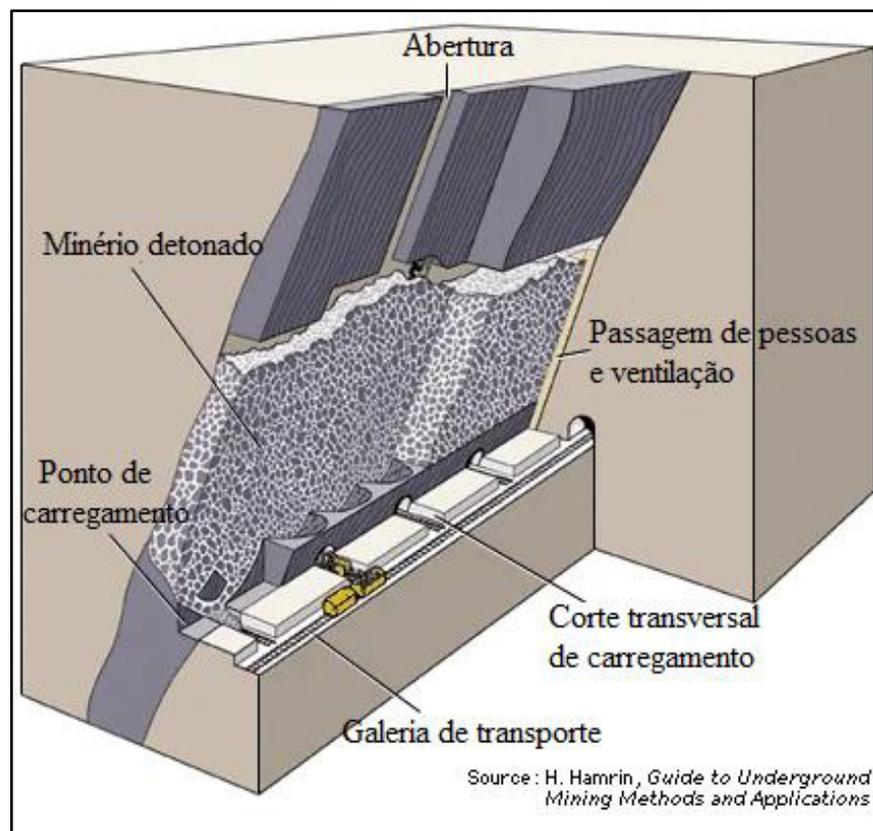
não permanecerão de pé durante sua vida ativa e quando grandes desmoronamentos ou subsidências superficiais não podem ser toleradas. (Hartman e Mutmansky, 2002)

Em concordância com Germani (2002) são menos produtivos que os métodos com aberturas autoportantes em condições semelhantes. A redução da produtividade se deve a detonações menores (podem-se usar vãos menores), operações mais integradas e dificuldades inerentes ao manuseio do minério em recalque ou do enchimento.

#### 4.3.2.1 Recalque (*Shrinkage Stopping*)

De acordo com Souza (2017) é um método de lavra ascendente no qual a maior parte do minério desmontado permanece no interior do realce aberto para servir como plataforma de trabalho. Segundo Haptonstall (2011), este método pode ser facilmente aplicado a corpos com espessura por volta de 1 metro, apesar de poder ser empregado com êxito para corpos de maior espessura. A Figura 8 ilustra um modelo esquemático de lavra por recalque.

Figura 8 - Recalque (*Shrinkage Stopping*)



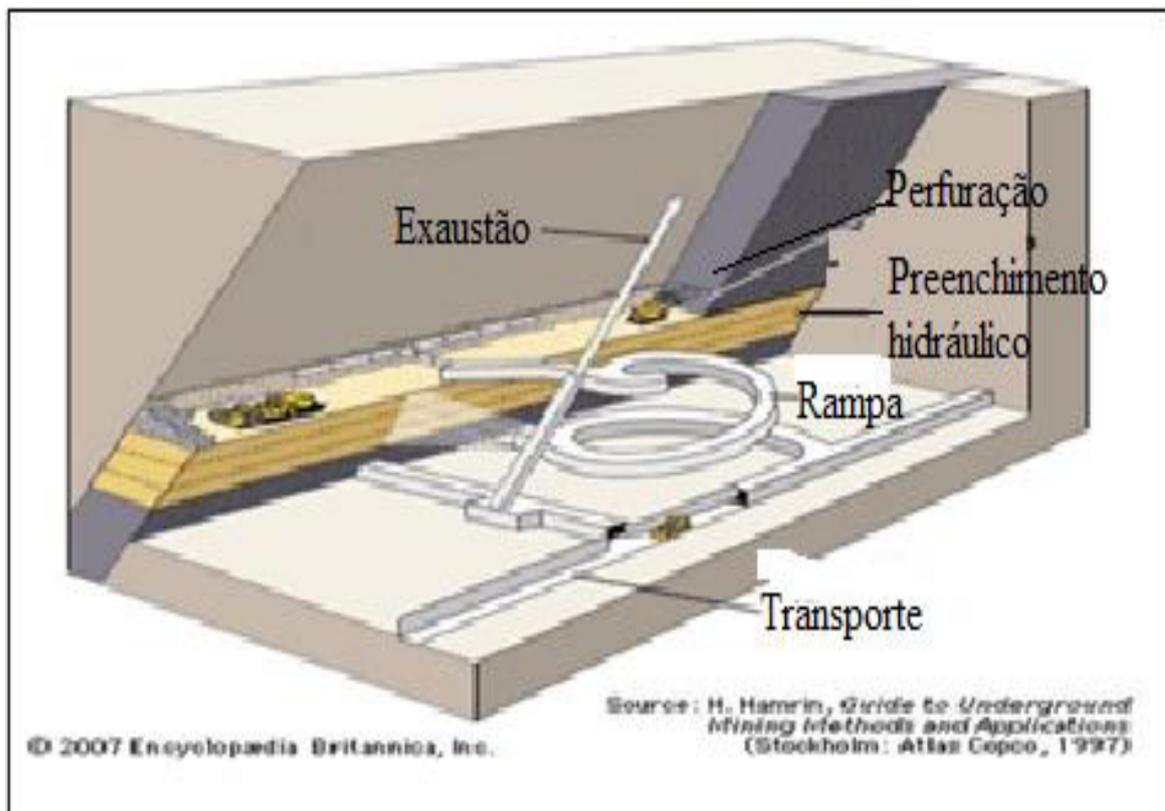
Fonte: Modificado de HAMRIN, 2001.

#### 4.3.2.2 Corte e Enchimento (*Cut and Fill*)

Corte e Enchimento é o método subterrâneo que requer o preenchimento dos espaços vazios deixados pela exploração por algum material (normalmente o próprio estéril previamente escavado) a fim de permitir a continuidade das operações de lavra, realizada de forma ascendente e em fatias horizontais. o enchimento tem como função essencial, garantir o suporte das encaixantes que, geralmente, apresentam baixa resistência mecânica. Além disso, são dois tipos de enchimento, o *backfill* e o *paste fill*. O primeiro é resultante do estéril e o segundo do rejeito (Hartman e Mutmansky, 2002).

Em conformidade com Souza (2017) o enchimento pode fornecer suporte das encaixantes para futuros trabalhos de escavação e manter uma camada de trabalho para o próximo nível da mina. A Figura 9 ilustra um modelo esquemático de utilização do método corte e enchimento.

Figura 9 – Arranjo Típico da lavra por Corte e Enchimento (*Cut and Fill*).



Fonte: Adaptado de Atlas Copco, 2007.

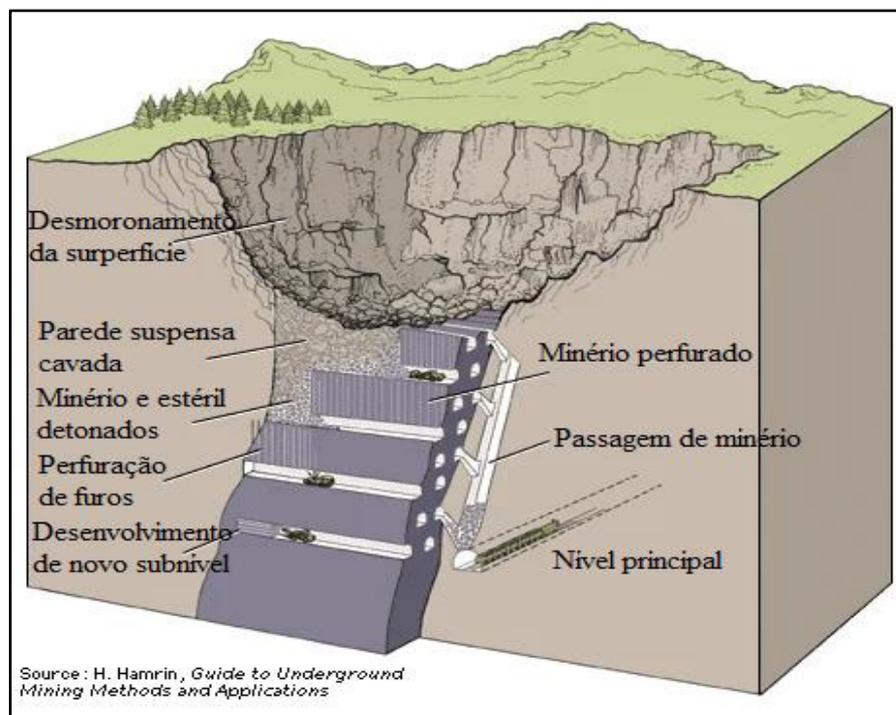
### 4.3.3 Métodos de lavra por abatimento

Dentre os métodos mais utilizados, encontram-se: Abatimento em Subníveis (*Sublevel Caving*), Abatimento por Blocos (*Block Caving*) e Paredes Longas (*Longwall*). Em congruência com Germani (2002) esses métodos exigem continuidade e uniformidade da qualidade do minério e que o estéril seja instável o suficiente para colapsar, preenchendo o espaço do minério removido. Dada a simplicidade das operações combinatórias a serem utilizadas, geralmente são métodos de alta produtividade.

#### 4.3.3.1 Subníveis (*Sublevel Caving*)

De acordo com Alvarenga (2012) este método é adequado para perfuração ascendente, geralmente usando furos de maior diâmetro, entre 76mm e 102mm. O carregamento e o transporte são efetuados por equipamentos semelhantes aos utilizados no método dos subníveis, utilizando sempre que possível equipamento de maior dimensão. Um desenho esquemático pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 – Abatimento em Subníveis (*Sublevel Caving*).

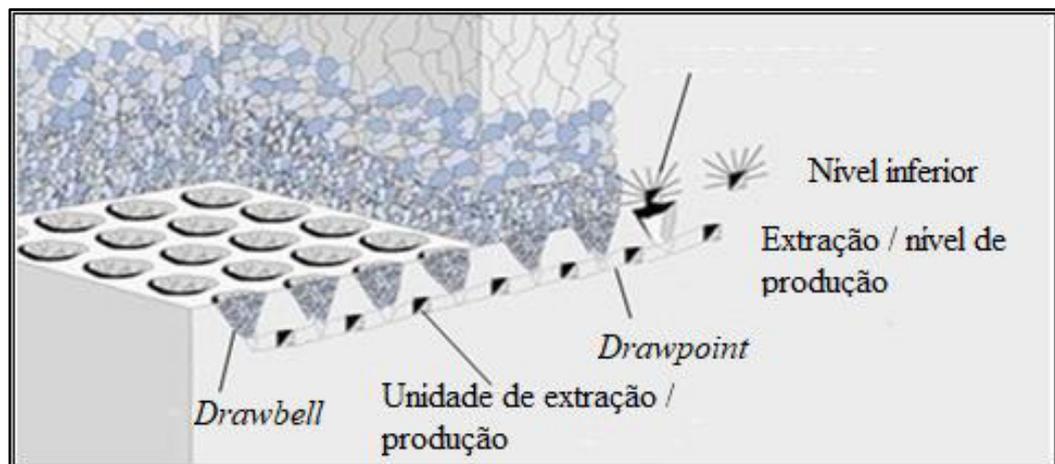


Fonte: Adaptado de HAMRIN, 2001.

#### 4.3.3.2 Abatimento em Blocos (*Block Caving*)

A lavra por abatimento em blocos (*Block Caving*) é um método em que massas, painéis ou blocos de minério são desmontados para induzir o abatimento, permitindo que o minério fragmentado seja escoado abaixo. Tanto minério quanto rocha encaixante são abatidos (Hartman e Mutmanský, 2002). A Figura 11 demonstra um arranjo típico da lavra executada através deste método.

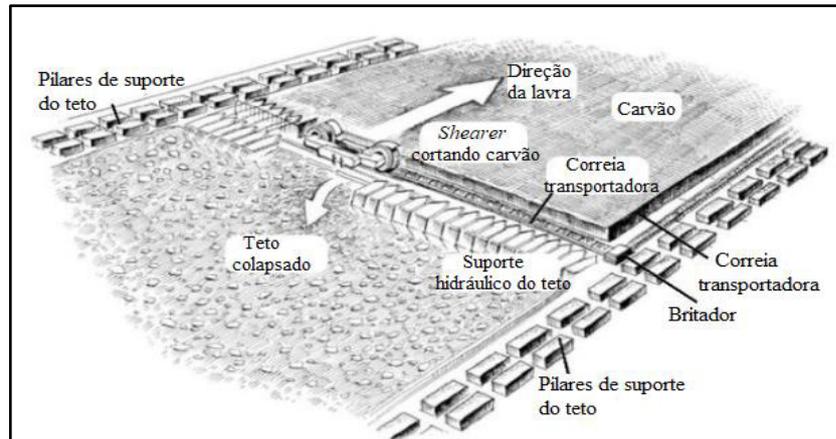
Figura 11 – Representação esquemática de uma mina de abatimento em blocos (*Block Caving*).



Fonte: Adaptado de Atlas Copco, 2010.

#### 4.3.3.3 Paredes Longas (*Longwall*)

Método adequado para formações relativamente horizontais, depósitos tabulares de baixa inclinação, em que se estabelece um longo canal de partida e se avança no minério perpendicularmente à uma extensa frente de lavra, complementado pelo rebaixamento completo do teto ou da parede lateral em sua retaguarda. Consoante com Bessinger (2011), a lavra por Paredes Longas (*Longwall*) é uma técnica que evoluiu amplamente nos últimos anos devido à necessidade de melhores condições de segurança e produtividade, redução de mão de obra e de custos. Um layout das operações de mineração *longwall* é mostrado na Figura 12.

Figura 12 – Representação das operações do método de mineração de carvão *longwall*.

Fonte: Adaptado de Peng, 2006.

#### 4.3.4 Comparação entre os métodos de lavra subterrânea

Levando em consideração as características de vários métodos de lavra subterrânea disponíveis, a Tabela 1 descreve as características dos mesmos e uma comparação dos ambientes de aplicação característicos. Essa comparação pode servir como ponto de partida para a seleção de métodos de lavra no projeto inicial e análise introdutória de custos; no entanto, deve-se considerar que para muitos ambientes e tipos de depósitos mais de um método de lavra pode ser aplicado (ARAÚJO *et al*, 2021).

Tabela 1 – Comparativo entre os métodos de lavra subterrânea

| Método                   | Câmara<br>s e<br>Pilares | Abatimento<br>em Blocos  | Recalque | Alargamento<br>em Subníveis | Corte e<br>Enchimento | Paredes<br>Longas | Abatimento em<br>Subníveis |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------|-----------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------------|
| <b>Produção<br/>ton</b>  | 30-80                    | 90-125                   | 5-10     | 15-30                       | 10-20                 | 75-180            | 20-40                      |
| <b>Recuperação %</b>     | 75                       | 10-20                    | 75-85    | 75                          | 90-100                | 70-90             | 90-125                     |
| <b>Diluição %</b>        | 10-20                    | 10-20                    | <10      | >20                         | 5-10                  | 10-20             | 10-20                      |
| <b>Desenvolvimento</b>   | pequeno                  | lento, extenso<br>e caro | moderado | lento e extenso             | pequeno-<br>moderado  | baixo             | alto                       |
| <b>Capital requerido</b> | moderado                 | alto                     | baixo    | moderado - alto             | moderado              | moderado          | moderado- alto             |

|                       |                        |                         |                           |               |                              |                    |  |
|-----------------------|------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------|------------------------------|--------------------|--|
| <b>Flexibilidade</b>  | flexível               | inflexível e rígido     | flexível                  | moderado      | inflexível                   | não flexível       | inflexível e rígido                        |
| <b>Seletividade</b>   | seletivo               | caving                  | moderado                  | não seletivo  | seletivo                     | não seletivo       | caving                                     |
| <b>Ground Control</b> | requer monitoramento   | ocorre subsidência      | bom                       | bom           | bom                          | ocorre subsidência | ocorre subsidência                         |
| <b>Segurança</b>      | ventilação ruim        | -                       | ruim                      | moderado      | requer mais suporte          | boa segurança      | boa segurança                              |
| <b>Aplicação</b>      | popular mina de carvão | eficiente alta produção | mineração de pouca escala | muito popular | aplicado em várias condições | minas de carvão    | altas produções com grande desenvolvimento |

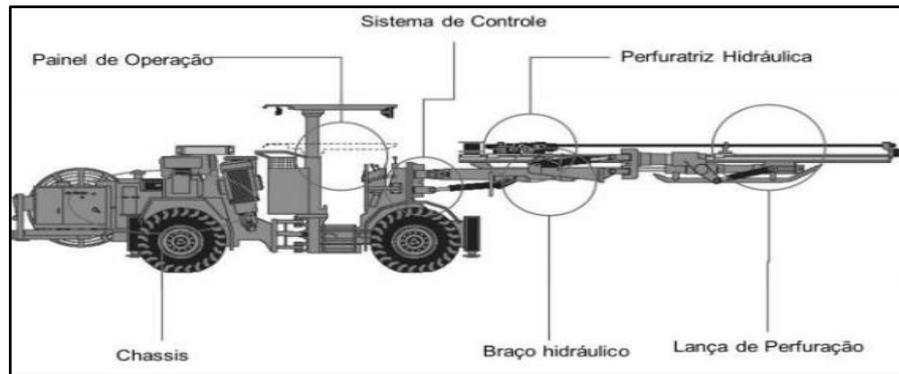
Fonte: Modificado de TATIYA, (2005, p. 405-491).

#### 4.4 Etapas do desenvolvimento e equipamentos utilizados em minas subterrâneas

Em conformidade com o Atlas Copco (2010) e Hamrin (2001), as seções transversais podem variar de 4 m<sup>2</sup> até 20 m<sup>2</sup>, dependendo do objetivo e da produção da mina. A forma da seção transversal é retangular ou varia de arco a circular, dependendo das condições do maciço rochoso, das condições de estabilidade necessárias e do método de escavação utilizado. As galerias de seção menor geralmente são perfuradas com perfuratrizes manuais, equipadas com empurradores pneumáticos.

Em galerias de seção média, pode-se utilizar perfuratrizes equipadas com um braço giratório hidráulico leve. As lanças hidráulicas de serviço pesado montadas sobre pneus são frequentemente usadas para escavar galerias com grandes seções transversais, embora não haja regras definidas para isso. O equipamento normalmente utilizado nessa etapa é o Jumbo, composto por um chassi movido a diesel que contém uma ou mais perfuratrizes rotoperçussivas elétricas acopladas em braços hidráulicos (PAIVA, 2016).

Figura 13 - Visão lateral do Jumbo e seus componentes.



Fonte: Paiva, 2016.

#### 4.4.1 Carregamento de explosivos

O carregamento da frente perfurada é feito através da injeção de explosivos nos devidos furos. Essa operação pode ser feita com uso de unidades de carregamento móveis que transportam e bombeiam os explosivos para dentro dos furos (HEINIÖ et al, 1999).

De acordo com Nieble (2017), explosivos do tipo ANFO e emulsões são mais usados atualmente. O ANFO, sigla para Ammonium Nitrate/Fuel Oil, é uma mistura de nitrato de amônio com óleo diesel, sendo uma opção de baixo custo, mas não recomendada para casos de ocorrência de água. Já as emulsões são explosivos gelatinosos constituídos por nitrato de amônio, pó de alumínio, nitroglicol e outros compostos. Esse tipo de explosivo pode ser encartuchado ou bombeado diretamente no furo, possuindo maior resistência à água.

#### 4.4.2 Carregamento e transporte de material

O material desmontado é carregado em caminhões por carregadeiras articuladas conhecidas como LHDs (*Load-Haul-Dump*) e transportado para determinado destino.

As LHDs são máquinas relativamente baixas e de estrutura articulada, o que facilita a movimentação em galerias subterrâneas. Segundo Darling et al (2011), elas possuem uma concha frontal cuja capacidade varia de 3 a 10 m<sup>3</sup>, de acordo com as dimensões das galerias e produtividade planejada. O autor também afirma que as LHDs podem ser elétricas ou movidas

à diesel, sendo que a segunda opção oferece maior versatilidade e facilidade de locomoção, comparado a modelos elétricos.

Figura 14 – LHD movida à diesel



Fonte: McCarthy, 2011.

Os caminhões utilizados para transporte de material em limpeza de frentes de desenvolvimento são rebaixados, podendo ser do tipo articulado ou rodoviário. Esses equipamentos podem ter capacidades de até 60 toneladas, sendo que maiores capacidades resultam em um menor custo operacional, mas em contrapartida requerem rampas, galerias e sistema de ventilação de maiores proporções (MCCARTHY, 2011).

Figura 15 - Caminhão Articulado Subterrâneo AD30 - Caterpillar



Fonte: Caterpillar Inc, 2011.

#### 4.4.3 Condicionamento

Uma consequência da detonação de uma frente de desenvolvimento é o fraturamento do maciço rochoso presente no teto e nas laterais da seção desmontada. Esse fraturamento provoca

a ocorrência de fragmentos de rocha soltos conhecidos como “chocos”, que podem cair a qualquer momento causando perdas materiais, lesões e até fatalidades (FARIA, 2008). A etapa de saneamento serve para remover os “chocos” da frente avançada após a limpeza de material, a fim de neutralizar o risco de queda de fragmentos de rochas no local. O saneamento pode ser realizado manualmente, com uso de uma alavanca apropriada, ou de forma mecânica com equipamentos conhecidos como *Scalers*. A limpeza manual é uma tarefa difícil e demorada, enquanto a operação mecânica é mais rápida e segura (Cline, 2011).

Figura 16 - Equipamento tipo *Scaler* em operação



Fonte: Normet. Disponível em: <https://www.normet.com>. Acesso em: 10 fev. 2023.

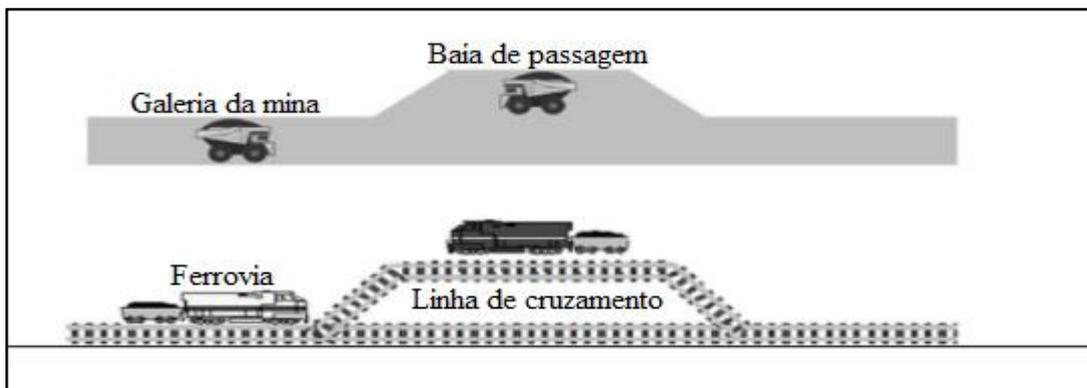
#### 4.5 Transporte em galerias utilizando rampas

Para Wilson (2004), a rampa, geralmente, é projetada de acordo com os equipamentos de transporte, sendo, normalmente, desenvolvida com inclinação de  $7^\circ$  até  $9^\circ$  (12,28% até 15,84%). Em geral, quanto menor o gradiente, menores os custos operacionais, porém, maiores serão as distâncias para se vencer uma determinada diferença de nível. Segundo Costa (2015), por volta de 3.000 (três mil) toneladas por dia são possíveis de se atingir, embora esta taxa não possa ser mantida de forma confiável. O acréscimo de caminhões, por outro lado, provocará, em certo momento, filas e dificuldade no controle destes.

Consoante Janine (2018) nas minas subterrâneas, os veículos de transporte movimentam minério de escavações subterrâneas para a superfície. Com isso, o tempo de deslocamento dentro da mina é importante, pois quanto maior, menor será a quantidade de minério extraído por turno de trabalho. As rampas construídas são estreitas e permitem a passagem de apenas um veículo. Para Fioroni (2014) a maioria das rampas possuem estruturas chamadas de baias

de passagem, ou *passing bays*, que são espaços estrategicamente localizados e que podem acomodar um caminhão. Quando um caminhão está em um túnel e outro se aproxima na direção oposta, um deles estaciona na baía de passagem e permite que o outro passe, o caminhão carregado tem a preferência, como apresentado na figura 17. Segundo Janine (2018) O número de *passing bays* e seus locais influenciam nos atrasos dos veículos descendentes e, portanto, na produtividade do transporte da mina.

Figura 17 – Baía de Passagem (*Passing Bay*)



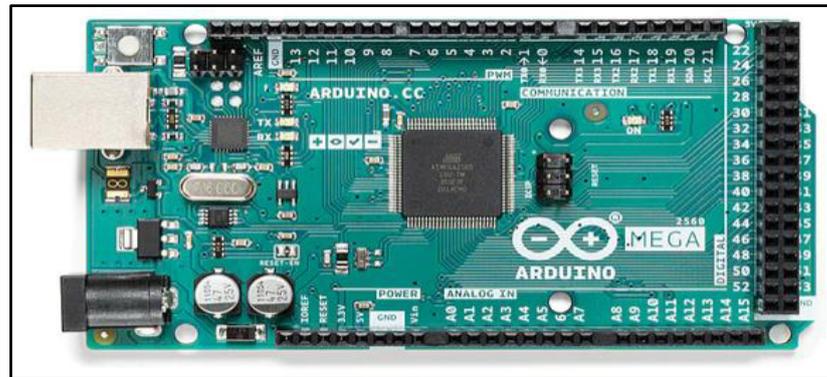
Fonte: Adaptado de FIORONI, 2014

#### 4.6 Arduino

O Arduino é uma versátil plataforma de prototipagem eletrônica, de hardware e software aberto, de baixo custo e muito fácil de usar, mesmo para aqueles que possuem pouco ou nenhum conhecimento de eletrônica. Quando se fala em Arduino deve-se ter em mente três conceitos: hardware que é a placa que possui como componente central um microcontrolador da família *ATmega*; *software* que consiste em uma linguagem de programação e um ambiente de desenvolvimento (Oliveira, 2018).

O Arduino Mega 2560 é uma placa micro controladora baseada no *ATmega2560*. Possui 54 pinos de entrada/saída digital (dos quais 15 podem ser usados como saídas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs (portas seriais de *hardware*), um oscilador de cristal de 16 MHz, uma conexão USB, um conector de alimentação, um conector ICSP, e um botão de reinicialização. A plataforma Arduino facilita ao máximo a programação de pequenos computadores, que na nomenclatura são chamados de micro controladores, aos quais fazem a interação com os objetos no mundo exterior ao da programação (Babos,2020).

Figura 18 – Vista da placa do Arduino Mega 2560.

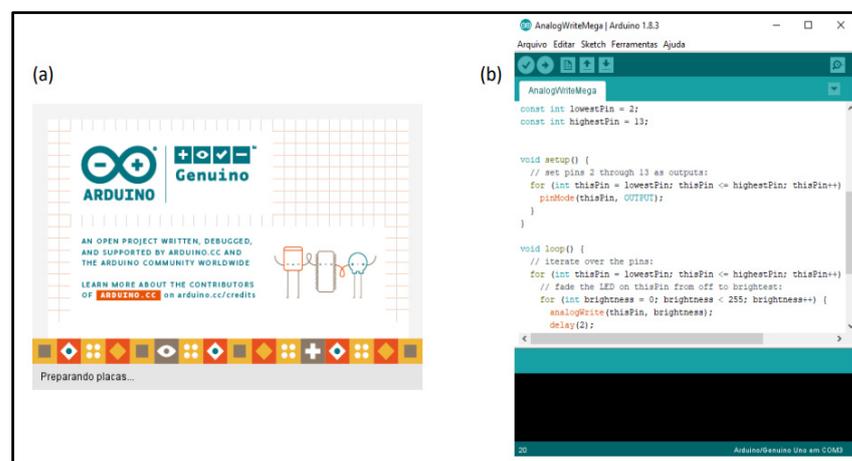


Fonte: Arduino.cc, 2022.

Conforme De Souza (2017) a sua programação é feita através de um IDE (ambiente de desenvolvimento integrado, como mostra a figura), as variáveis são declaradas, as instruções são inseridas dentro das funções `setup()` e `loop()`, a eletrônica é implementada, o hardware é conectado e, seu comando começa a funcionar. A programação é, para a maior parte dos usuários, a etapa mais difícil para os iniciantes em Arduino. A programação é um conjunto de instruções para fazer algo, como calcular o número  $\pi$  com 20 casas decimais, resolver um sistema de equações, permitir o acesso de um cliente a um servidor remoto ou monitorar a quantidade de vagas disponíveis em um estacionamento de um shopping, por exemplo. No Arduino, esse conjunto de instruções se chama “*sketch*”.

Figura 19 – (a) Iniciando a IDE do Arduino no Windows 10.

(b) *Sketch* aberto com o código “AnalogWriteMega”, exemplo contido no IDE.



Fonte: IDE ARDUINO.

#### 4.6.1 Sensores

Recebem o estímulo externo de origem física ou química e o transformam em sinal elétrico que permite extrair informações sobre si mesmo e do ambiente a sua volta que são necessárias para tomada de decisões. Os sensores podem ser classificados de diferentes formas, como, por exemplo, por métodos de medição, em passivos ou ativos (SOUSA,2018).

#### 4.6.2 Atuadores

A partir do sinal recebido pelo sensor, a placa Arduino tomará uma decisão que será executada pelo atuador. Conforme Sousa (2018), os Atuadores podem ser definidos como um mecanismo capaz de efetuar ou executar uma ação ou movimento. Um atuador pode trabalhar de forma ativa, necessitando de uma constante alimentação externa de energia, ou passiva, que utiliza a energia gerada pela ação da mecânica dos efetadores em sua interação ao ambiente exposto. Nos robôs temos como exemplos de atuadores motores elétricos, cilindros hidráulicos ou pneumáticos, materiais sensíveis à temperatura e componentes químicos.

Os sensores podem ser divididos em duas classes: proprioceptivos, que são os que realizam medidas dos dados internos do próprio robô como a carga da sua bateria e giro das rodas, e os sensores extraceptivos, que obtêm as informações do meio ambiente em que o robô está inserido, como o GPS, sonar e câmera, que lhe permitem obter informações de localização. (WOLF et al,2009).

### 4.7 Tinkercad

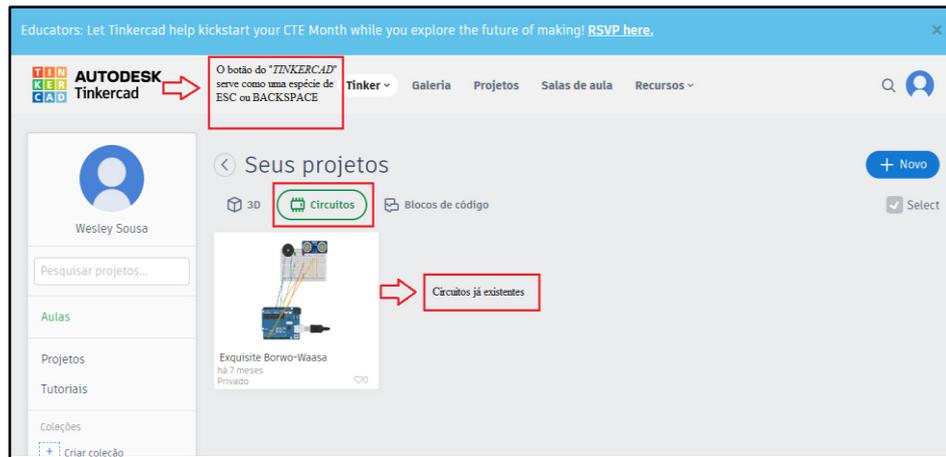
O simulador de circuitos *Tinkercad* é uma ferramenta online e gratuita, desenvolvida pela empresa Autodesk Inc. O objetivo é emular os componentes eletrônicos e o ambiente de programação diretamente no computador. Outrossim, a plataforma possui o emulador do Arduino que permite manipular projetos de prototipagem de hardware e software. O *Tinkercad* simula os diversos componentes de forma bastante realista, incluindo um ambiente de desenvolvimento para o Arduino idêntico ao real (SANCHES, 2020).

No contexto educacional, as simulações computacionais são concebidas para serem estimulantes e interativas, para conectar conteúdos em estudo com o mundo real e para fornecer

múltiplas representações, permitindo experimentações e verificações (CERCONI; MARTINS, 2014).

A plataforma fornece o simulador de circuitos elétricos, além de emular a placa de Arduino modelo mega2560, dentre outras, e o seu ambiente de desenvolvimento, como ilustrado na Figura 20.

Figura 20 – Ambiente *Tinkercad*



Fonte: Adaptado, Autodesk *Tinkercad*.

## 5 TRABALHOS RELACIONADOS

Os tópicos a seguir contemplam aplicações diversas de prototipagem em Arduino que, de uma forma ou de outra, possuem relações e semelhanças com o objetivo deste trabalho.

### 5.1 Desenvolvimento de um Semáforo Inteligente Utilizando Arduino e Sensores Infravermelhos

Santos *et al* (2019) realizou um estudo visando a necessidade de buscar soluções práticas capazes de evitar atropelamentos, principalmente nas faixas de pedestres, já que boa parte desses acidentes ocorrem em situações em que os veículos atravessam o sinal vermelho ou não conseguem frear a tempo. Com o objetivo de melhorar este cenário, foi desenvolvida uma maquete de um Semáforo Inteligente, utilizando Arduino para administrar os estados (semáforos) deste protótipo; dois sensores infravermelhos (modelo E18-d80nk), para funcionar como um radar, possibilitando o cálculo da velocidade dos veículos que passarão pelo semáforo e; um display LCD, para informar aos pedestres se é seguro atravessar.

A proposta do trabalho foi possibilitar a detecção de um sensor que detecta um veículo que se aproxima do semáforo através dos sensores infravermelho e através do display avise ao pedestre se existe algum risco de atravessar (mesmo que o sinal esteja verde para ele).

Os dados fornecidos pelos sensores infravermelhos precisam ser processados e interpretados para serem transformados em informação. Deste modo, o Arduino foi utilizado para esta tarefa e, por fim, enviar um comando ao display LCD que é responsável por informar ao pedestre se é seguro atravessar a rua.

### 5.2 Prototipagem de estacionamento inteligente com comunicação sem fio

Da Silva *et al* (2019) realizaram um estudo da quantidade de carros no estacionamento do Instituto Federal de Ciência Educação e Tecnologia do Piauí - Campus Teresina central, onde existe uma grande demanda por vagas para estacionar e uma reduzida quantidade de vagas disponíveis, ocasionando uma enorme aglutinação de carros fora dos locais apropriados. Com o objetivo de melhorar esse processo, desenvolveu-se um sistema que permite fazer uma comunicação sem fio entre a vaga do estacionamento e uma central de controle, de onde se monitora todo o sistema. A comunicação entre sistema e central de controle consiste na

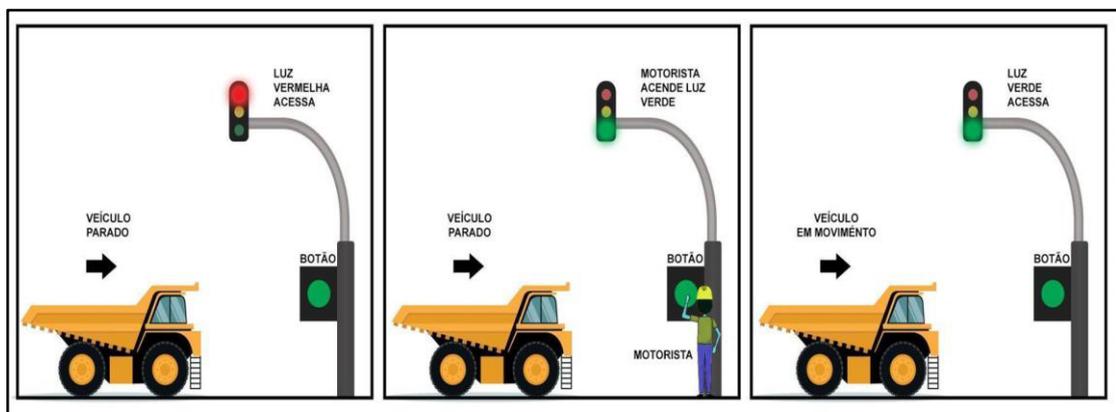
interação de dispositivos diferentes, onde o sistema localizado na vaga opera por meio da interligação entre um sensor ultrassônico, a plataforma microcontrolada Arduino e o um rádio emissor, que utiliza a tecnologia de comunicação sem fio Zigbee.

A proposta do trabalho foi fixar um poste de pvc ao chão, com um sensor ultrassônico, um rádio Zigbee emissor, um Arduino e uma fonte de alimentação acoplada em seu interior. Estes são instalados em todas as vagas do estacionamento, em um local onde permita ao equipamento a captação da onda sonora que reflete no veículo presente no local, ou seja, quando o sensor detectar a existência de um objeto a sua frente, de distância menor ou igual a 50 cm, mandará essa informação captada para o Arduino conectado a ele, que enviará esta informação para um rádio Zigbee emissor, também acoplado ao Arduino. O rádio Zigbee emissor enviará os dados da informação recebida, para o rádio Zigbee receptor localizado na guarita, conectado a um computador, que direciona os bytes para um software específico presente no computador, onde o mesmo indicará no monitor um esboço da planta do estacionamento, mostrando a localização das vagas. Cada vaga poderá receber dois sinais: o sinal 1 indicando que a vaga está ocupada e o software mudará automaticamente a cor da vaga para vermelho; e o sinal 0 onde o software atende a informação de desocupado e muda a cor da vaga para verde.

## 6 MATERIAIS E MÉTODOS

Através de entrevista com profissionais da área, percebe-se que para o caso do transporte realizado em minas subterrâneas através de rampas de via única o acionamento dos semáforos pode ser executado de forma manual, acarretando em uma provável perda de tempo no processo e na exposição do operador a possível ocorrência de sinistros, como podemos verificar na Figura 21.

Figura 21 – Representação do sistema de semáforo em minas subterrânea de "mão única".



Fonte: Autor, 2022.

Em uma mina subterrânea as galerias de tráfego geralmente não são suficientemente largas para se cruzarem dois caminhões. Assim, sempre que um caminhão ascende a rampa carregado de minério, nenhum outro pode descer, e vice-versa, em determinados trechos. A prioridade quando dois equipamentos de transporte sobre pneus necessitam de fazer o percurso, em sentidos opostos em uma mesma via é sempre para o que está carregado de material. Caso estes se encontrarem a meio do percurso, o caminhão vazio terá que recuar até permitir a passagem daquele que está carregado. Este procedimento pode não somente elevar os custos com consumo de combustíveis, como também elevar o tempo gasto nas manobras adicionais e provocar, desta forma, redução de produtividade. Tendo em vista essas problemáticas, este trabalho consiste na criação de um protótipo em escala piloto com a utilização do sistema Arduino Mega 2560, para automatizar o sistema de semáforos, visando uma maior produtividade e segurança do transporte de minas subterrâneas de via única.

## 6.1 Planejamento

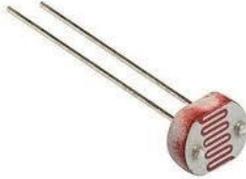
Foi utilizado o Arduino Uno Rev3, que conforme comentado anteriormente no Tópico 4.6, possui uma série de facilidades para se comunicar com computador, outro Arduino ou outros microcontroladores, e esse é o principal motivo pelo qual foi escolhido como o controlador central do projeto. Por este foram passadas todas as informações, onde o mesmo irá tratá-las e atuar, conforme solicitado. No *tinkercad* foi analisado o tempo de resposta e a distância ideal a ser utilizada no projeto. Com isso, foi realizada a seleção de sensores mais apropriados na aplicação e no planejamento do sistema.

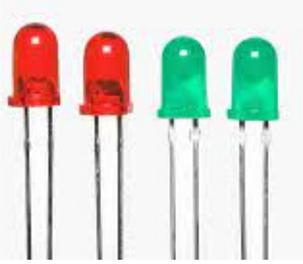
## 6.2 Desenvolvimento do protótipo

Foi construída uma maquete para simular o tráfego de veículos em uma mina subterrânea de via única para protótipo de automação dos semáforos em escala piloto, com a utilização da placa Arduino. Para a construção da maquete foram utilizados vários materiais, que somados os valores totalizam R\$ 213,00, como mostra a tabela 2.

Tabela 2: Materiais utilizados na construção do protótipo proposto neste trabalho.

|  |  |
|--|--|
| <p>Placa de MDF: Utilizada como pista para o tráfego dos veículos. Valor R\$ 120,00 reais</p>                  |  |
| <p>Tintas para madeira: Utilizada para delimitar a passagem dos veículos. Valor das tintas R\$ 30,00 reais</p> |  |

|  |  |
|--|--|
| <p>Canudos plásticos: Utilizados como postes para os leds. Valor dos canudos R\$ 0,50 centavos</p>                                     |    |
| <p>Cabos de rede: Utilizados para realizar as conexões entre os componentes e a placa arduino. Valor R\$ 20,00 reais</p>               |    |
| <p>Fotoresistor: Sensor de luminosidade utilizado para identificar a presença dos automóveis e ativar os leds. Valor R\$7,50 reais</p> |   |
| <p>Furadeira: Para possibilitar a acoplagem dos semáforos e sensores.</p>  |  |
| <p>Pistola de cola quente: Para fixar os fios na placa de mdf.</p>   |  |

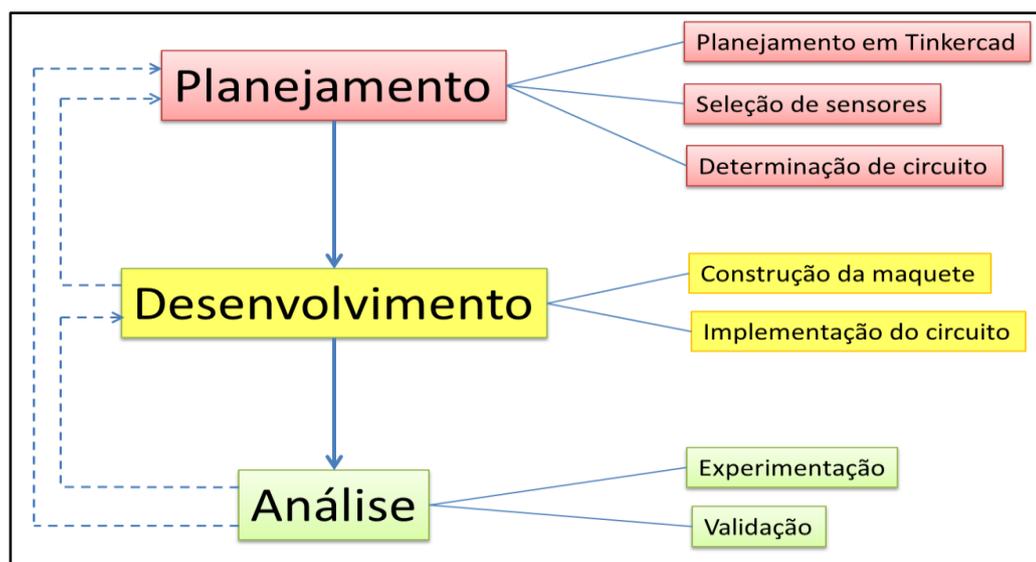
|  |  |
|--|--|
| <p>Carros de brinquedo: Utilizado para simular os carros utilizados em uma mina subterrânea.</p> |  |
| <p>Leds verde e vermelho: Utilizados para os semáforos. Valor R\$ 5,00 reais</p>                 |  |

Fonte: Autor,2023.

### 6.3 Análise da funcionalidade do sistema

Foi realizada a verificação do funcionamento dos semáforos de acordo com o sentido dos caminhões maquete, nas vias do protótipo, de forma que estes semáforos controlem o fluxo de veículos de acordo com as preferências de tráfego. A figura 22 retrata todas as etapas do projeto.

Figura 22 – Esquematização das etapas do projeto.



Fonte: Autor, 2022.

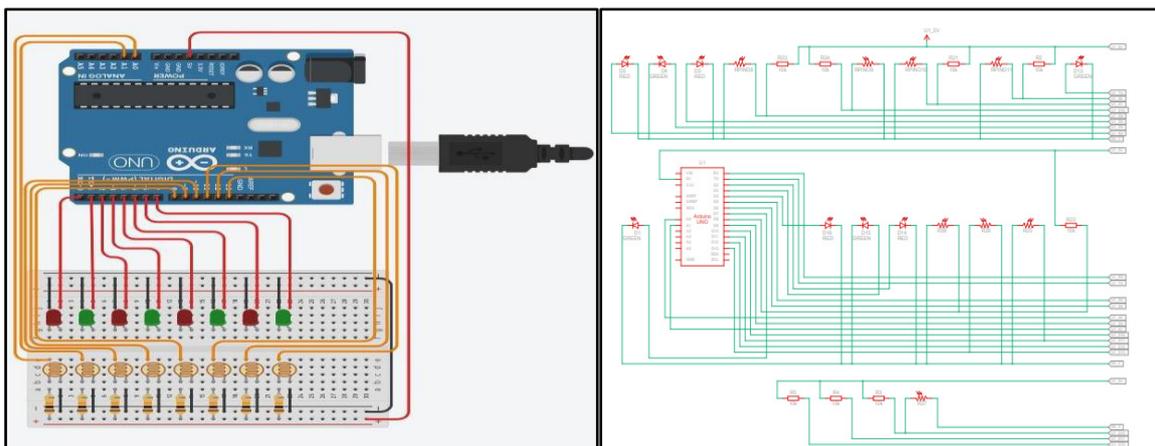
## 7 RESULTADOS

As análises experimentais foram executadas e se foi validado o funcionamento do protótipo feito em escala piloto. Ou seja, foram selecionados e utilizados sensores e atuadores funcionais na escala pretendida, um protótipo, fazendo com que o sistema de semáforo desenvolvido e instalado seja funcional, que perceba a presença e sentido de deslocamento dos veículos maquete e, assim, tomasse decisões sobre o controle de tráfego nas vias de acesso desta.

### 7.1 Circuito planejado em *Tinkercad*

Neste software, foi delimitado de forma prévia a funcionalidade do Arduino Uno com sensores e verificados os comandos da programação de *processing*, que é a programação utilizada pelo IDE e também foram feitos projetos de automação baseados na funcionalidade do projeto como retrata a figura 23, aplicáveis no modelo que foi utilizado para a construção do protótipo em escala piloto. A parte física da maquete foi idealizada para representar uma mina subterrânea de via única em escala piloto 2d.

Figura 23 - (a) Projeto de automação dos semáforos em escala piloto no *Tinkercad*. (b)Planta elétrica do projeto de automação dos semáforos em escala piloto no *Tinkercad*



Fonte: Autor,2023.

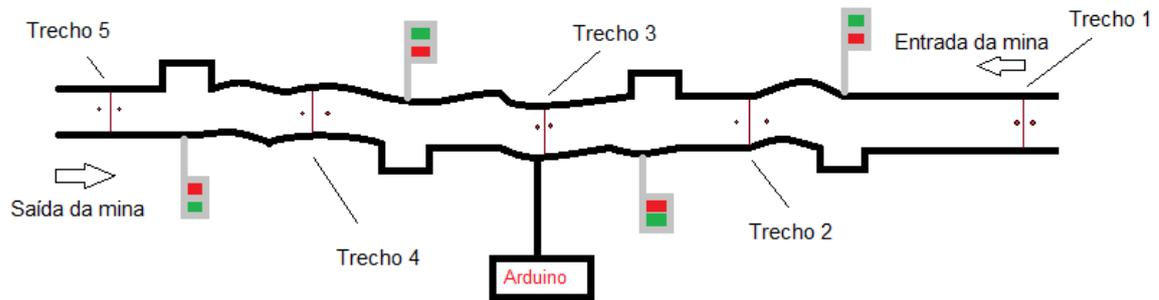
## 7.2 Construção da maquete

Na execução das etapas deste trabalho, a construção do protótipo em Arduino, foi desenvolvido uma maquete que simula o tráfego em uma mina subterrânea de maneira autônoma como mostra figura 25.

A maquete foi dividida em trechos para simular as rampas em uma mina subterrânea. O veículo, ao adentrar a mina, passará pelo trecho 1 e acionará o fotoresistor que mandará a informação do sentido do tráfego para a placa arduino e o arduino emitirá um comando para os leds dos semáforos do trecho 1 e 2 ficarem vermelhos. Ao passar pelo trecho 2 acionará o fotoresistor que irá mandar a informação do sentido do tráfego para a placa arduino e o arduino enviará um comando para os leds dos semáforos do trecho 2 e 3 ficarem vermelhos. Ao passar pelo trecho 3 acionará o fotoresistor que mandará a informação do sentido do tráfego para a placa arduino e o arduino emitirá um comando para os leds dos semáforos do trecho 3 e 4 ficarem vermelhos. Ao passar pelo trecho 4 acionará o fotoresistor que enviará a informação do sentido do tráfego para a placa arduino e o arduino emitirá um comando para o led do semáforo do trecho 4 ficar vermelho.

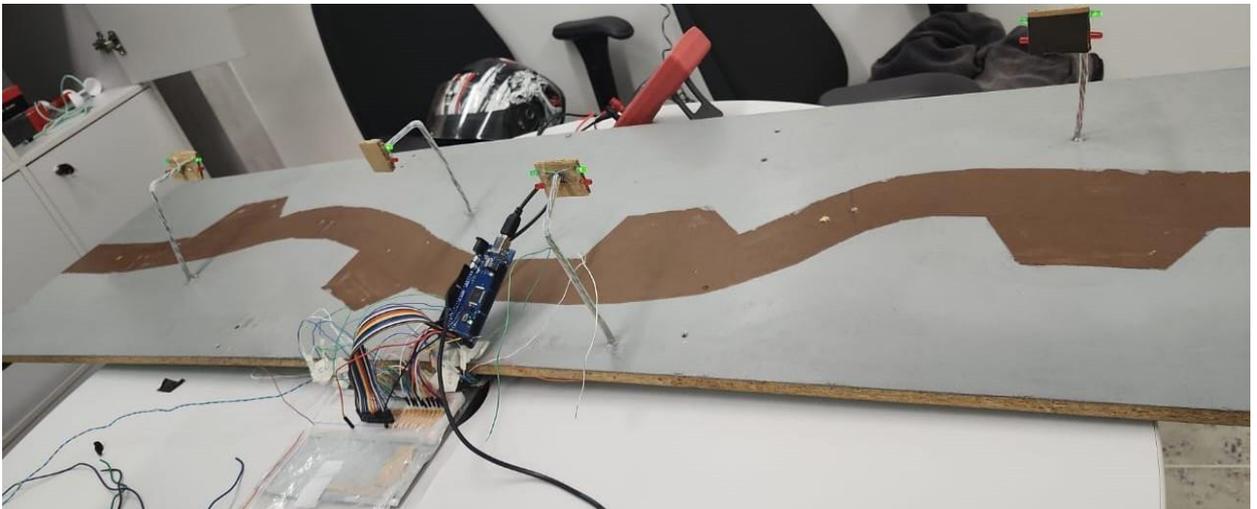
Quando o caminhão carregado estiver subindo tem a preferência em relação aos transportes que estiverem descendo na mina. Com isso o caminhão carregado ao passar pelo trecho 5 adentrando ao trecho 4 acionará o fotoresistor que mandará a informação do sentido do veículo para o arduino, este emitirá o comando para os semáforos dos trechos 4 e 3 ficarem vermelhos, para os veículos que trafegarem no sentido oposto estacionarem no passing bay. Ao passar pelo trecho 3 acionará o fotoresistor que mandará a informação do sentido do veículo para o arduino, este emitirá o comando para os semáforos dos trechos 3 e 2 ficarem vermelhos, para os veículos que transitarem no sentido oposto estacionarem no passing bay. Ao passar pelo trecho 2 acionará o fotoresistor que enviará a informação do sentido do veículo para o arduino, que lançará o comando para os semáforos dos trechos 2 e 1 ficarem vermelhos, para os veículos que percorrerem no sentido oposto estacionarem no passing bay. Ao passar pelo trecho 1 irá acionar o fotoresistor que enviará a informação do sentido do veículo para o arduino, que mandará o comando para os semáforo do trecho 1 ficar vermelho, com isso todos os outros semáforos estarão verdes. Como retrata a figura 24.

Figura 24 - Planta baixa protótipo



Fonte: Autor,2023.

Figura 25 - Maquete completa



Fonte: Autor,2023.

### 7.3 Lógica de programação de Arduino utilizada

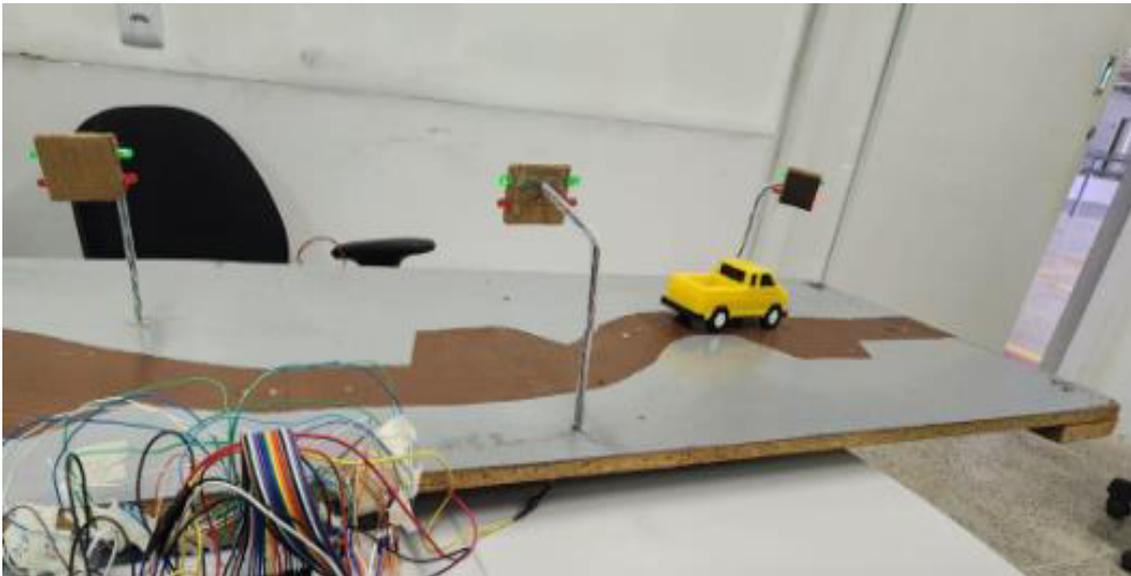
O código é projetado para controlar um sistema de semáforos. O código começa definindo os pinos que serão utilizados para os sensores e as saídas dos semáforos em cada cruzamento. O método `setup()` é responsável por configurar os pinos como entradas ou saídas e inicializar o display LCD. O método `loop()` é onde a lógica principal acontece, ele verifica o estado dos sensores em diferentes cruzamentos e determina como os semáforos devem ser ajustados com base nesses estados. A lógica de controle dos semáforos é implementada principalmente através das funções `detecta`, `preferencia`, e `sentido`, e os resultados são refletidos

no acionamento dos pinos de saída correspondentes. Além disso, o código utiliza a comunicação Serial para imprimir informações de depuração. A lógica específica de controle de semáforos está baseada nas condições dos sensores, mas a interpretação exata depende da disposição física dos sensores e semáforo

#### 7.4 Validação do protótipo

**Trecho 1:** O veículo carregado em direção a saída da mina ao passar pelo fotoresistor do nível 2, onde o mesmo detectou o veículo e emitiu um sinal do sentido que o equipamento de transporte trafegava para a placa arduino mega. Com isso, a placa emitiu um comando para a ativação do led vermelho no semáforo do trecho 1 e os semáforos dos outros trechos estavam verdes, como retrata a figura 26, fazendo com que um possível veículo que caminha em sentido contrário estacione no *passing bay*.

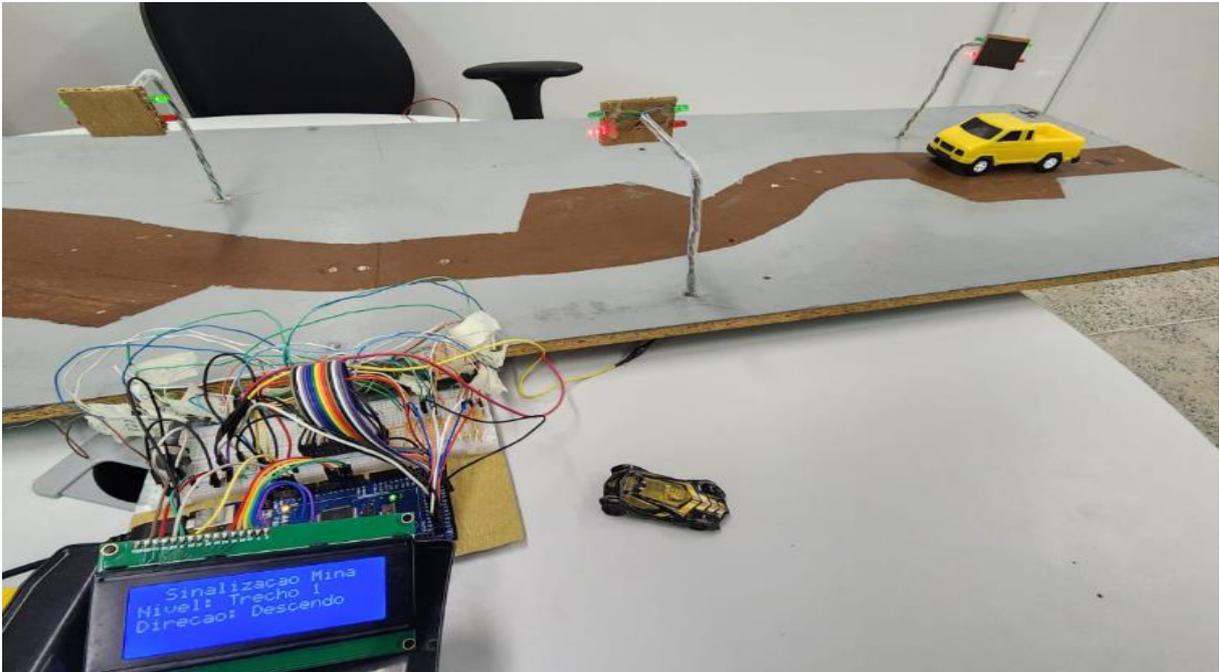
Figura 26: Trecho 1 saída da mina



Fonte: Autor,2023.

**Trecho 1:** Veículo adentrando a mina para carregar, passou pelo trecho 1 e acionou o fotoresistor do nível 1, onde o mesmo detectou o veículo e emitiu um sinal do sentido que o equipamento de transporte caminhava para a placa arduino mega. Com isso a placa emitiu um comando para a ativação dos leds vermelhos nos semáforos dos trechos 1 e 2, como ilustra a figura 27.

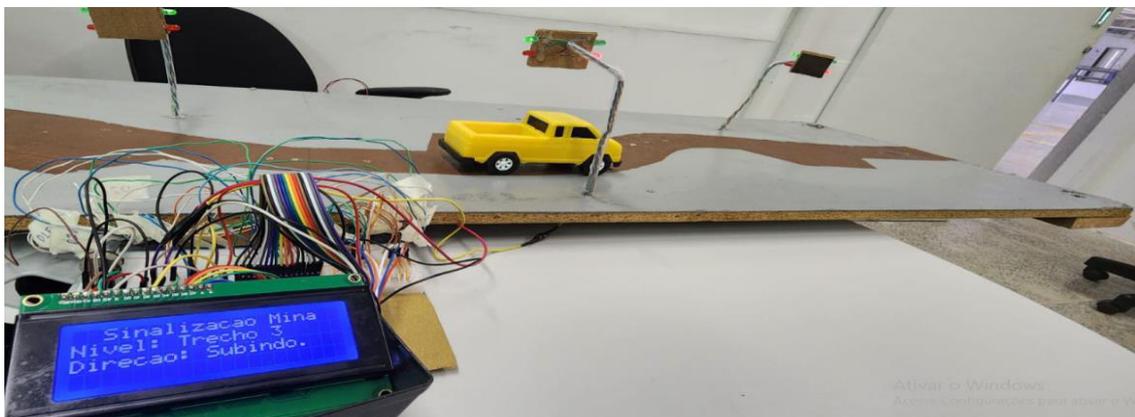
Figura 27: Trecho 1 entrada da mina



Fonte: Autor,2023.

**Trecho 2:** O veículo carregado em direção a saída da mina ao passar pelo fotoresistor do nível 2, o mesmo detectou o veículo e emitiu um sinal do sentido que o equipamento trafegava para a placa Arduino mega. Após isso, a placa emitiu um comando para a ativação dos leds vermelhos nos semáforos dos trechos 2 e 1, como ilustra a figura 28, fazendo com que os veículos que em sentido contrário estacionem no *passing bay*.

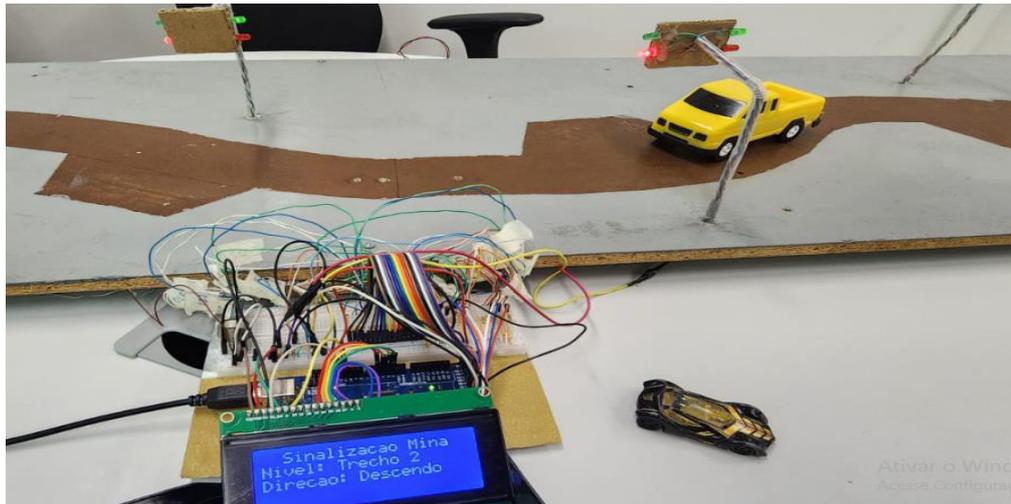
Figura 28: Trecho 2 saída da mina



Fonte: Autor,2023.

**Trecho 2:** Veículo entrando na mina para carregar, passa pelo trecho 2 e aciona o fotoresistor do nível 2, onde o mesmo detectou o veículo e emitiu um sinal do sentido que o transporte percorria para a placa Arduino mega. Finalmente, a placa emitiu um comando para a ativação dos leds vermelhos nos semáforos dos trechos 2 e 3, como ilustra a figura 29.

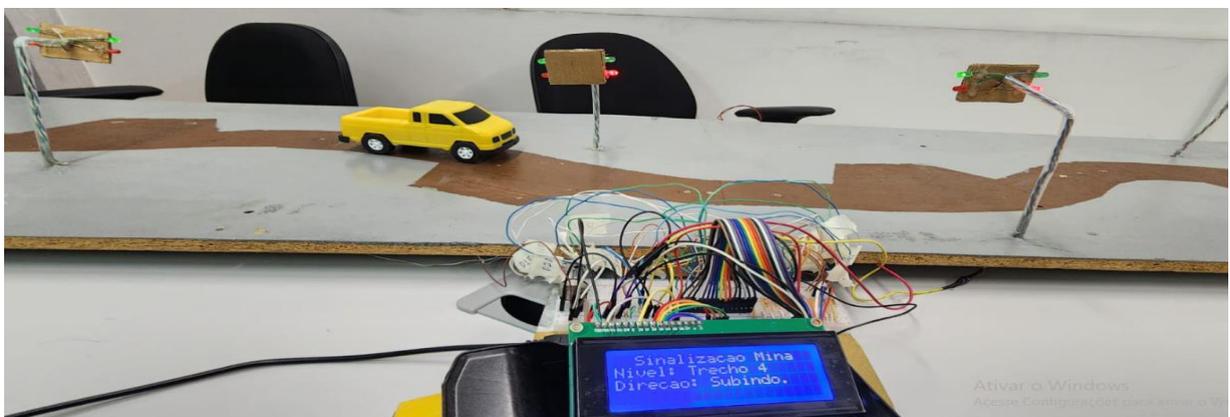
Figura 29: Trecho 2 entrada da mina



Fonte: Autor,2023.

**Trecho 3:** O veículo carregado em direção a saída da mina passa pelo fotoresistor do nível 3, o mesmo detectou o veículo e emitiu um sinal do sentido que o transporte caminhava para a placa Arduino mega, com isso a placa emitiu um comando para a ativação dos leds vermelhos nos semáforos dos trechos 3 e 2, como ilustra a figura 30, fazendo com que os veículos que viessem em sentido contrário estacionarem no *passing bay*.

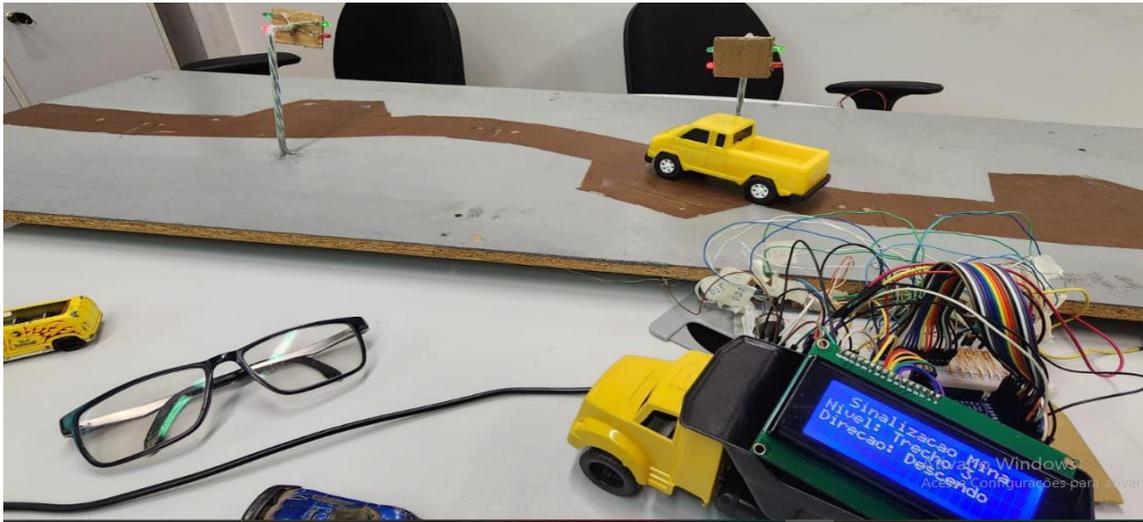
Figura 30: Trecho 3 saída da mina



Fonte: Autor,2023.

**Trecho 3:** Veículo entrando na mina para carregar, passa pelo trecho 3 e aciona o fotoresistor do nível 3, onde o mesmo detectou o veículo e emitiu um sinal do sentido que o transporte trafegava para a placa arduino mega. Após isso, a placa emitiu um comando para a ativação dos leds vermelhos nos semáforos dos trechos 3 e 4, como ilustra a figura 31.

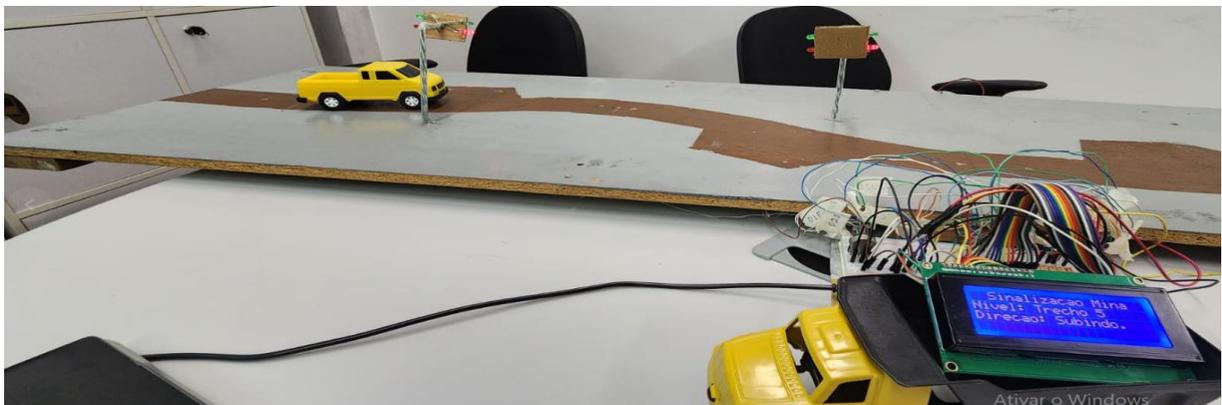
Figura 31: Trecho 3 entrada da mina



Fonte: Autor,2023.

**Trecho 4:** O veículo carregado ao adentrar a via em direção a saída da mina passou através do fotoresistor do nível 4. O mesmo detectou o veículo e emitiu um sinal do sentido que o transporte percorria para a placa arduino mega. Deste modo, a placa emitiu um comando para a ativação dos leds vermelhos nos semáforos dos trechos 4 e 3, fazendo com que os veículos que caminhavam em sentido contrário estacionarem no passing bay.

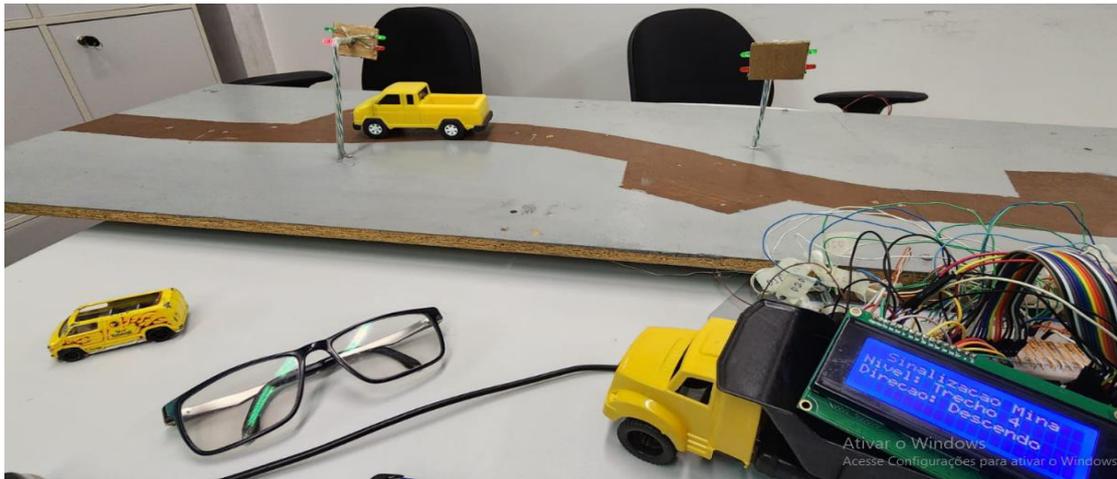
Figura 32: Trecho 4 saída da mina



Fonte: Autor,2023.

**Trecho 4:** O veículo adentrando na mina para carregar, passou pelo trecho 4 e acionou o fotoresistor do nível 4, onde o mesmo detectou o veículo e emitiu um sinal do sentido que o transporte caminhava para a placa arduino mega. Assim, a placa emitiu um comando para a ativação do led vermelho no semáforo do trecho 4, como ilustra a figura 33.

Figura 33: Trecho 4 entrada da mina

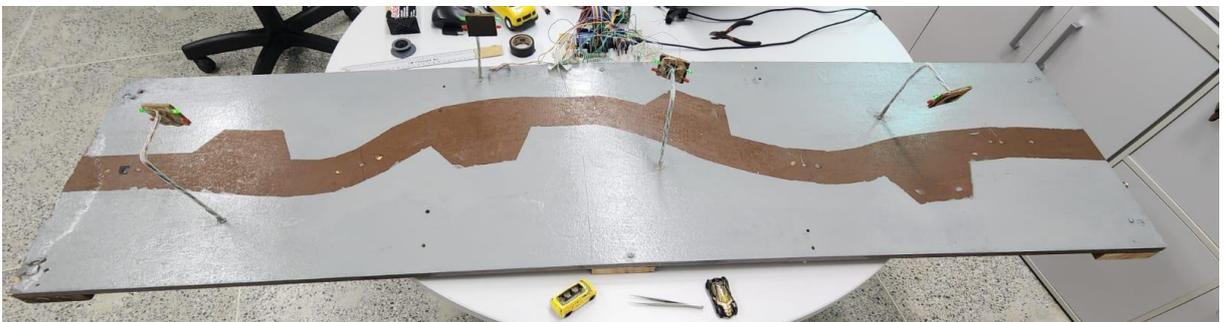


Fonte: Autor,2023.

Além dos trechos acima experimentados, foram programados e testados mais dois cenários para que o transporte na mina ocorresse da maneira mais eficiente possível.

**1º Cenário:** Quando não tiver passagem de veículos pelos trechos da mina os semáforos estarão todos verdes, como mostra a figura 34, assim representando o tráfego livre na mina.

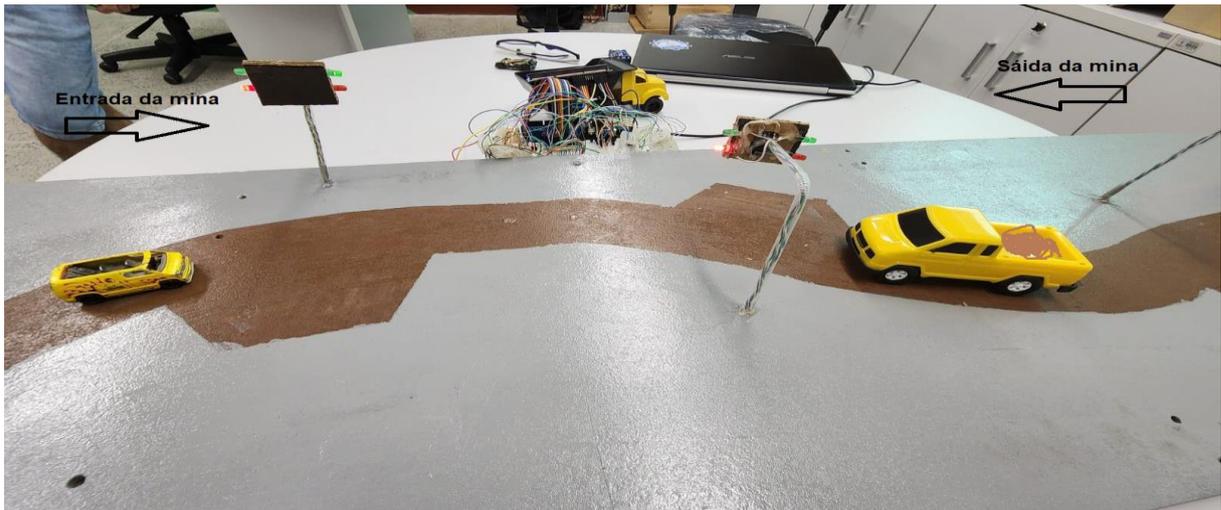
Figura 34: Trechos sem trânsito



Fonte: Autor,2023.

**2º Cenário:** Caminhão carregado tem a preferência. Quando este trafegava em direção à saída da mina, passando pelo trecho 4 adentrando ao trecho 3 ativou o fotoresistor. O sensor detectou a passagem do veículo e acionou a placa arduino mega. A mesma emitiu um comando para os semáforos do trecho 3 e 2 ficassem vermelhos para, assim, os transportes que estivessem caminhando no sentido contrário estacionassem nos passing bays, como retrata a figura 35.

Figura 35: Veículos em sentidos contrários



Fonte: Autor,2023.

O protótipo do circuito de trânsito controlou o tráfego de veículos como fora planejado, gerenciando a passagem dos equipamentos, evitando paradas desnecessárias dos caminhões carregados e acidentes em meio do percurso nos trechos programados. A comunicação entre semáforos e a placa arduino foi realizada por meio de fios elétricos, mas podem ser feitas por meio de conexão *wifi*. Os sensores e atuadores utilizados neste protótipo são robustos e podem ser utilizados em uma escala maior, como em uma mina com equipamentos maiores, os sensores terão que ser adaptados para o tamanho dos equipamentos, mas a lógica da funcionalidade poderá ser a mesma.

## 8 CONCLUSÃO

O protótipo construído para o tráfego de equipamentos de transporte em minas subterrâneas foi devidamente montado e adequado para uso. Com o uso do Arduino juntamente com os sensores e a linguagem de programação utilizada pode ser possível determinar o sentido e a presença dos veículos, possibilitando o tráfego da mina com mais segurança e agilidade, ocasionando uma melhora na produção de material e na segurança do tráfego na mina.

A simulação do tráfego de transporte realizados para cada trecho da mina possibilitou um melhor dimensionamento dos *passing bays* e dos semáforos, ocasionado em uma melhor fluidez no tráfego da mina.

Diante disso, o protótipo e o sistema idealizado mostraram ser eficientes para a automação de semáforos em minas subterrâneas, tornando-os funcionais e acessíveis para uso em empreendimentos mineiros de pequeno e médio porte.

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALFORD, Christopher; BRAZIL, Marcus; LEE, David H.. **Handbook Of Operations Research In Natural Resources** pp 561-577. Chapter 30 - optimisation in underground mining, 2007.

ALVARENGA, J. de F. **Estudo dos índices operacionais da lavra subterrânea no Brasil**. 2012. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

ARAÚJO *et al*, Vinícius Igor Albuquerque Batista de Araújo. **Modelo de estimativa dos custos de capital e operacional de lavra subterrânea através de curvas parametrizadas obtidas por estudos de viabilidade**, ufrgs/ppge3m, 2021.

ARRUDA, Agnaldo Fernando Vieira de. **Aplicação dos princípios ergonômicos nos sistemas de gestão de segurança e saúde do trabalho** [tese]: uma proposta de modelo conceitual na mineração subterrânea / Agnaldo Fernando Vieira de Arruda; orientadora, Leila Amaral Gontijo. – Florianópolis, SC, 2011.

ATLAS COPCO - **Underground Mining: A global review of methods and practices** - Primeira Edição – 2014.

ATLAS COPCO - **Underground Mining: MINING METHODS**- Segunda Edição – 2007.

ATLAS COPCO. **Manual de ar comprimido**. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 2010.

BABOS, Flavio. APRENDA ARDUINO DO ZERO, 2020, disponível em: <https://flaviobabos.com.br/wp-content/uploads/2020/11/o-guia-definitivo-para-aprender-arduino-na-pratica-1.pdf>

BESSINGER, S. L. - **Longwall Mining - In: Darling, P. SME Mining Engineering Handbook**, Terceira Edição - Cap 13.8. 2011

BRIGOLINI, Neme, Milton; Curi, Adilson; da Silva, José Margarida; Borges Carneiro, Aida Carolina, **Realização de projeto de lavra de mina subterrânea com utilização de aplicativos específicos** Rem: Revista Escola de Minas, vol. 64, núm. 4, outubro-diciembre, 2011.

Caterpillar Inc, **Características do AD30, 2011**, disponível em: <https://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/C10292980>

CERCONI, Franciele do Belém Makuch; MARTINS, Marcio André. Recursos tecnológicos no ensino de matemática: considerações sobre três modalidades. **SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA-4**, 2014..

CLINE, Joe. Construction of Underground Openings and Related Infrastructure In: DARLING, Peter. SME Mining Engineering Handbook, Terceira Edição. Cap 12.6. 2011.

CHADWICK, J. **Underground Haulage. Mining Magazine. Australia**, September 2000.

COSTA, Leandro de Vilhena. **Análise das opções de vias de produção e acesso em minas subterrâneas**. 2015. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Mineral. Programa de pós-graduação em Engenharia Mineral.

CURI, Adilson. **Lavra de minas**. Oficina de Textos, 2017.

DA SILVA, Antônio, Diarmison Rosa el tal, **Protótipagem de estacionamento inteligente com comunicação sem fio**, 2019.

DE SOUZA, Marco Polo Moreno, **Curso Básico de Arduino**, 2017.

FARIA, Mário Parreiras de. Fatores Intervenientes Na Segurança Do Trabalho De Abatimento Mecanizado De Rochas Instáveis Em Uma Mina Subterrânea De Ouro. 2008. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Medicina, Faculdade de Medicina, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

FIORONI, Marcelo Moretti et al. **Avaliação da logística de uma mina subterrânea utilizando simulação**. Rem: Revista Escola de Minas [online]. 2014, v. 67, n. 4 [. Acessado 11 junho 2022], pp. 447-454.

GERMANI, Darcy José. **A mineração no Brasil: Relatório final**. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos: Rio de Janeiro, 2002.

HAMRIN, H. **Underground mining Methods: Engineering Fundamentals and International Cases Studies**. Edited by W. A. Hustrulid and R.I. Bullock. Littleton, CO: SME.2001.

HARTMAN, Howard L.; MUTMANSKY, Jan M. **Introductory mining engineering. 2. ed**. New Jersey: John Wiley and Sons, 2002.

HAPTONSTALL, J. - **Shrinkage Stopping –In: Darling, P. SME Mining Engineering Handbook**, Terceira Edição - Cap 13.3. 2011.

HEINIÖ, Matti. (ed.). **Rock Excavation Handbook. Sandvik Tamrock Corp**. 1999.

JANINE, Thais. **Dimensionamento de frota de uma mina subterrânea usando simulação**, 2018.

JUNIOR, Carlos Roberto Campos; ZENHA, Taiana Moreira; RECLA, Thayla Aparecida Rigo; SILVA, Washington Luis Vieira da. **Desenvolvimento de uma metodologia para**

**redução do consumo específico de diesel em caminhões fora de estrada em uma empresa do setor de mineração.** Simposio de Excelência em Gestão e Tecnologia, 2013.

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, jul /set. 2001.

MELO, M. R. B. **Estudo da viabilidade do método shrink stope na mina do mamão, município de floresta do Araguaia-pa.** 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas). Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas, Tocantins, 2014.

**MINE-NET.BLOGSPOT.COM**, 2011, Acesso em 11 de junho de 2022, disponível em <http://mine-net.blogspot.com/2011/04/>.

NIEBLE, Carlos Manoel. **Desmontes cuidadosos com explosivos: aspectos de engenharia e ambientais.** São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

OLIVEIRA, Michel Melo. **Dimensionamento Empírico de Realce Em Sublevel Stopping.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais.

OLIVEIRA, Cláudio Luís Vieira Oliveira. **Aprenda Arduino – Uma abordagem prática.** [Texto de Cláudio Luís Vieira Oliveira, Humberto Augusto Piovesana Zanetti, Cristina Becker Matos Nabarro e Júlio Alberto Vansan Gonçalves]. – Duque de Caixas: Katzen Editora, 2018.

PAIVA, Guilherme. **Aplicação de tecnologias de informação e automação em minas subterrâneas: desafios e perspectivas.** 138 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2016.

Peng, S.S. **Longwall Mining**, Morgantown Printer, 2<sup>a</sup> ed., 621 p. (2006).

SAAYMAN, Paul. **Optimization Of An Autonomous Vehicle Dispatch System In An Underground Mine.** Faculty of Engineering, the Built Environment and Information Technology - UNIVERSITY OF PRETORIA. April, 2005.

SANCHES, Guilherme Ferreira. **A Utilização do emulador de arduino tinkercad para o ensino de lógica de programação e eletrônica.** (2020).

SANTOS, Alisson, et al. **"Desenvolvimento de um semáforo inteligente utilizando arduino e sensores infravermelhos."** Anais da XIX Escola Regional de Computação Bahia, Alagoas e Sergipe. SBC, 2019.

SILVA, J. M. **Lavra subterrânea: Acesso principal**, 2013. UFOP.

SOUSA, Leandro Magno Gomides de. **Modelagem e compensação de erro de sensores e atuadores baseados em arduino**. 2018. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Sistemas de Informação) - Universidade Federal de Uberlândia, Monte Carmelo, 2018.

SOUZA, Raphael Costa. **Lavra subterrânea de veios estreitos: dificuldades e soluções**. 2017. 47 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

TATIYA, R. R. **Surface and Underground Excavations – Methods, Techniques and Equipment**. Balkema. 2005, p. 405-491

WILSON, R. B; WILLIS, R. P. H. **Considerations in the choice of primary access and transportation options in platinum mines**. Platinum Adding Value. pp. 269-273, 2004.

WOLF, D. F. et al. **Robótica móvel inteligente: Da simulação às aplicações no mundo real**. In: SN. Mini-Curso: Jornada de Atualização em Informática (JAI), Congresso da SBC. [S.l.], 2009. p. 13.