



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CRATEÚS**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS**

**JOSÉ MATHEUS SALES MOTA**

**PROTOTIPAGEM DE REGULADOR DE FLUXO DE AR DE MINA  
SUBTERRÂNEA EM PLATAFORMA ARDUÍNO**

**CRATEÚS/CE**

**2023**

JOSÉ MATHEUS SALES MOTA

PROTOTIPAGEM DE REGULADOR DE FLUXO DE AR DE MINA  
SUBTERRÂNEA EM PLATAFORMA ARDUÍNO

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)

---

M871p Mota, José Matheus Sales.  
Prototipagem de regulador de fluxo de ar de mina subterrânea em plataforma Arduino / José Matheus Sales Mota. – 2023.  
61 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. Ventilação de mina subterrânea. 2. Prototipagem em Arduino. 3. Regulador de fluxo de ar. I. Título.  
CDD 622

---

JOSÉ MATHEUS SALES MOTA

**PROTOTIPAGEM DE REGULADOR DE FLUXO DE AR DE MINA  
SUBTERRÂNEA EM PLATAFORMA ARDUÍNO**

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 Mina

Aprovada em:    /    /    .

**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 Rêgo Soares  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Robson Ribeiro Lima  
Universidade Federal do Pernambuco (UFPE)

Aos meus pais, Junior e  
Joelma

## **AGRADECIMENTOS**

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

“ O homem não é a soma do que tem, mas a totalidade do que ainda não tem, do que poderia ter ” (Jean Paul Sartre).

## RESUMO

A ventilação de uma mina subterrânea é uma importante operação auxiliar que objetiva manter condições ambientais seguras e saudáveis para aqueles que trabalham nestes ambientes e estão expostos a riscos como gases tóxicos, poeiras, umidade e desconforto térmico. Neste sentido, as normas regulamentadoras para a mineração, exigem determinados fluxos mínimos e máximos de ar para as denominadas frentes de trabalho, que podem ser frentes de desenvolvimento ou de lavra. Porém, a ventilação deste tipo de mina é executada de forma artificial, com a utilização de ventiladores de altas pressão e potência, que possuem um alto custo aquisitivo e de operação. Dito isto, vê-se que manter os fluxos de ar em valores constantes que atendam a necessidade de mitigação dos riscos à saúde e segurança e que melhorem a eficiência do sistema, reduzindo custos, mostra-se bastante necessário. Desta forma, este trabalho se propõe a planejar e construir um protótipo de um monitorador e regulador de fluxo de ar em plataforma Arduino, com baixo custo, robusto e que simule a necessidade de uma mineração subterrânea. Para tal, se fez necessário planejamento em ambiente Tinkercad do circuito em arduino, para análise e adequação dos sensores necessários, desenvolvimento e construção de uma maquete que simula galerias subterrâneas através de dutos por onde escoar o fluxo de ar simulado e, por fim, integrar os sensores e atuadores necessários com a maquete e com a plataforma arduino, para viabilizar a construção do protótipo. Após construído o protótipo, foi executada uma validação através de análise dos fluxos de ar monitorados e requeridos e dos tempos demandados para que o arduino consiga tomar a decisão desejada. Por fim, o protótipo reduziu o fluxo de ar em média 29%, sendo do ponto de vista acadêmico um projeto acessível (custo de R\$184,00), além de atender a padrões de segurança, destaca-se pela adaptabilidade a diferentes ambientes e fácil modificação de intervalos.

**Palavras-chave:** Ventilação de mina subterrânea; Prototipagem em Arduino; Regulador de fluxo de ar.

## ABSTRACT

The underground mine ventilation is an important auxiliary operation that aims to maintain safe and healthy environmental conditions for those who work in these environments and are exposed to risks such as toxic gases, dust, humidity and thermal discomfort. In this sense, the regulatory standards for mining require certain minimum and maximum air flows for the so-called work fronts, which can be development or mining fronts. However, the ventilation of this type of mine is performed artificially, with the use of high pressure and power fans, which have a high acquisition and operating cost. That said, it can be seen that keeping air flows at constant values that meet the need to mitigate health and safety risks and improve system efficiency, reducing costs, is very necessary. In this way, this work proposes to plan and build a prototype of an airflow monitor and regulator on an Arduino platform, with low cost, robustness and that simulates the need for underground mining. For this, it will be necessary to plan the circuit in Arduino in a Tinkercad environment, for analysis and adaptation of the necessary sensors, development and construction of a model that simulates underground galleries through ducts which the simulated air flow and, finally, integrate the sensors and actuators needed with the model and with the Arduino platform, to enable the construction of the prototype. After the prototype is built, a validation will be carried out through the analysis of the monitored and required air flows and the times required for the Arduino to make the desired decision. Finally, the prototype reduced airflow by an average of 29%, making it an affordable project from an academic point of view (cost of R\$184.00), in addition to meeting safety standards, it stands out for its adaptability to different environments and easy modification of intervals.

**Keywords:** Underground mining ventilation; Arduino prototyping; air flow regulator.

## LISTA DE FIGURA

Figura 1: Principais componentes de um sistema de ventilação (Adaptado de Mcpherson, 1993).....	21
Figura 2: Ventilação auxiliar soprante (Adaptado de VUTUKURI e LAMA, 1986).....	22
Figura 3: Ventilação auxiliar por exaustão (Adaptado de VUTUKURI e LAMA, 1986).....	22
Figura 4: Ventilação auxiliar por exaustão com reforço soprante (Adaptado de VUTUKURI e LAMA, 1986).....	23
Figura 5: Ventilação auxiliar soprante com reforço por exaustão (Adaptado de VUTUKURI e LAMA, 1986).....	23
Figura 6: Elementos básicos de um ventilador centrífugo (Adaptado de VUTUKURI e LAMA, 1986). ....	24
Figura 7: Elementos básicos de um ventilador axial (VUTUKURI e LAMA, 1986).....	25
Figura 8: (a) Modelo de regulador, (b) modelo de portas, (c) modelo de barragem, (d) modelo de cruzamento de ar. (Fonte: Division of Mines, 2004).....	27
Figura 9: Componentes do Arduino UNO.....	31
Figura 10: Ambiente de desenvolvimento (TURRA, 2018).....	32
Figura 11: Ambiente Tinker.....	33
Figura 12: Fluxograma representativo das etapas da metodologia proposta.....	35
Figura 13: Modelo da maquete do projeto.....	38
Figura 14: Modelo de circuito planejado em Tinkercad.....	39
Figura 15: Gráfico de calibragem do protótipo de RPM para m/s.....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição média do ar limpo e seco .....	18
Tabela 2 : Consumo de energia e custo por tonelada para ventilação presente no ciclo da mineração subterrânea, estudo realizado em minas no Canadá.(Adaptado de COSTA & SILVA, 2019) .....	29
Tabela 3: Materiais utilizados na construção do protótipo proposto neste trabalho.....	36
Tabela 4: Calibragem de RPM para m/s.....	46
Tabela 5: Dados para a validação do projeto.....	49
Tabela 6: Média de comparação do fluxo regulado com o aberto.....	52

## LISTA DE IMAGENS

Imagem 1: Conjunto de blastflow regulators da empresa Minova .....	26
Imagem 2: Tubos PVC 75mm.....	40
Imagem 3: Pistola de cola quente.....	40
Imagem 4: Ventoinha. ....	41
Imagem 5: Rolamentos.....	41
Imagem 6: Servo Motor.....	42
Imagem 7: Fibra de vidro.....	42
Imagem 8: Papelão.....	43
Imagem 9: Plástico ABS.....	43
Imagem 10: Arduino .....	44
Imagem 11: Jumper.....	44
Imagem 12: Proto-board.....	45
Imagem 13: Display led 16 pinos.....	45

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

NR	Normas regulamentadoras
NRM	Normas regulamentadoras de mineração
VOD	Ventilação sob demanda
VFD	Inversores de frequência variável
CIPEC	Programa da Indústria Canadense para Conservação de Energia
IoT	Internet of Things
PWM	Modulação por Largura de
MHz	Pulso Megahertz
USB	Universal Serial Bus
ICSP	In Circuit Serial Programming
GPS	Global Positioning System
LED	Light Emitting Diode
IDE	Ambiente de Desenvolvimento Integrado
RAD	Rapid Application Development
RPM	Rotação Por Minuto

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>\$</b>	Dólar
<b>%</b>	Porcentagem
<b>&amp;</b>	Ampersand

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b> .....	15
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	16
	<b>3.1 Objetivo Geral</b> .....	16
	<b>3.2 Objetivos Específicos</b> .....	16
<b>4</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	17
	<b>4.1 Norma Regulamentadora NR 22</b> .....	17
	<b>4.2 Ventilação subterrânea</b> .....	17
	4.2.1 Propriedades do ar .....	18
	4.2.2 Características do ar no interior das minas .....	19
	4.2.3 Objetivos de um sistema de ventilação de mina .....	20
	<b>4.3 Elementos de um Sistema de ventilação</b> .....	20
	4.3.1 Ventilação principal e auxiliar .....	21
	4.3.2 Ventiladores centrífugos .....	23
	4.3.3 Ventiladores axiais .....	24
	4.3.4 Reguladores .....	25
	4.3.5 Portas .....	26
	4.3.6 Barragens .....	27
	4.3.7 Cruzamento de ar .....	27
	<b>4.4 Ventilação sob demanda (VOD)</b> .....	28
	<b>4.5 Custos de ventilação</b> .....	28
	<b>4.6 Arduino</b> .....	29
	4.6.1 Componentes básicos do Arduino .....	30
	4.6.2 Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE) .....	31
	4.6.3 Tinkercad .....	32
	4.6.4 Sensores e atuadores .....	33
	<b>4.7 Trabalho Relacionado</b> .....	34
	4.7.1 Simulação e maquetes em práticas pedagógicas como método de aprendizagem: lavra subterrânea .....	34
<b>5</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	35
	<b>5.1 Construção da maquete do sistema anemômetro/regulador</b> .....	36
	<b>5.2 Integração da maquete com a placa Arduino</b> .....	37
	<b>5.3 Validação do sistema anemômetro/regulador</b> .....	37
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	38
	<b>6.1 Circuito planejado em Tinkercad</b> .....	38
	<b>6.2 Construção da maquete</b> .....	39

<b>6.3 Calibragem de RPM para m/s .....</b>	<b>46</b>
<b>6.4 Lógica de programação de arduino utilizada.....</b>	<b>48</b>
<b>6.5 Validação do projeto.....</b>	<b>49</b>
<b>7 CONCLUSÃO.....</b>	<b>53</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>54</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A manutenção da sociedade moderna é dependente de recursos minerais, sendo uma importante fonte de matéria prima para diversos setores da indústria. Neste contexto, se inserem as minerações subterrâneas, bastante importantes para o setor da indústria mineral, produzindo diversos tipos de minérios . A lavra em minas subterrâneas possui riscos inerentes à sua operação, onde gases tóxicos, gases inflamáveis, combustíveis e poeiras podem se fazer presentes nestes ambientes tornando o ar inviável à respiração humana, com potencial de prejudicar a saúde daqueles que estão expostos a estes contaminantes (RAMJACK, 2015). Para mitigar esses riscos, a aplicação de sistemas de ventilação se torna extremamente necessária, sendo este, um dos mais importantes sistemas funcionais para operação em minas subterrâneas. Estes sistemas englobam a conexão de galerias e dutos, juntamente com as fontes de pressão e esquemas de controle que produzem e governam o fluxo de ar ao longo da mina (COSTA, 2017).

A ventilação em mina subterrânea possui como principal objetivo manter a segurança e saúde do trabalhador presente nestes ambientes enclausurados, diluindo contaminantes como gases e poeiras e melhorando o conforto térmico. Condições ambientais subterrâneas devem atender às normas vigentes (NR 22); quando as condições exigidas pela norma não são mantidas, causam efeitos negativos no rendimento operacional, principalmente as condições ligadas à temperatura (BRASIL, 2020).

Este trabalho objetivou planejar e construir um protótipo para a automatização de uma maquete de sistema de ventilação de mina subterrânea, por meio do monitoramento e controle de fluxo de ar utilizando reguladores autônomos, mantendo fluxos desejados em determinados pontos controlados. Pretende-se gerar alternativas de projetos para estes tipos de sistema que funcione em um ambiente real de mina subterrânea, com montagem simples e custos reduzidos, e que sejam robustos para o que se propõe, visto que, minas subterrâneas são ambientes insalubres para sistemas eletrônicos.

Os capítulos que seguem abordarão a justificativa do trabalho, bem como as finalidades propostas, sendo, dessa forma, uma revisão bibliográfica sobre a qualidade do ar em minas subterrâneas, também a respeito dos elementos de um sistema de ventilação e a utilização de arduino em protótipos de automação, indicará a metodologia proposta e os resultados encontrados com a aplicação desta metodologia.

## 2 JUSTIFICATIVA

As operações de lavra de minas subterrâneas, por serem executadas em ambientes enclausurados, necessitam de ventilação artificial, para que possam ocorrer de forma que não gerem ou que se minimizem os riscos associados às operações e ao ambiente em que se desenvolvem. Estas operações podem impactar negativamente os custos totais da mineração, isto se deve ao fato dos ventiladores de um mina subterrânea poderem possuir altos custos de aquisição e de operação, por apresentarem altas potências de trabalho e que, multiplicados pelo tempo de funcionamento (ventiladores devem sempre atuar enquanto a mina estiver em operação), podem acarretar em altos gastos com energia elétrica.

Nestes tipos de minerações o controle do fluxo de ar em determinadas galerias é imprescindível, de forma que os contaminantes, as temperaturas e umidades presentes naqueles locais se mantenham em limites saudáveis. Deste modo, controlar o fluxo de ar que se dirige a determinadas frentes de trabalho, de forma autônoma, utilizando sistemas de baixo custo e de simples planejamento e construção, se mostra interessante, garantindo um fluxo constante concomitantemente com sua monitoração.

Manter um fluxo de ar constante em determinadas galerias se mostra necessário em virtude de, para ditas concentrações de determinados contaminantes, é necessária uma estabelecida vazão de ar para que sua diluição seja conseguida a níveis de concentração seguros.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo Geral**

Contribuir para o monitoramento e regulação da velocidade e fluxo de ar em minas subterrâneas.

#### **3.2 Objetivos Específicos**

- Manipular softwares de prototipagem para planejamento e teste de circuitos em Arduino;
- Empregar o Arduino para construção de um protótipo de regulador de fluxo de ar ;
- Adequar o uso de sensores para contaminantes específicos ;
- Adequar atuadores para controlar abertura do regulador de fluxo de ar ;
- Validar protótipo em Arduino para monitoramento e controle do fluxo de ar

## **4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Neste capítulo discutiremos sobre as normas estabelecidas para ventilação de mina subterrânea no Brasil, explicando algumas características deste tipo de ventilação e como se dá o controle de fluxo de ar nestes ambientes.

### **4.1 Norma Regulamentadora NR 22**

No Brasil, as Normas Regulamentadoras que estabelecem diretrizes a serem seguidas para a operação de ventilação em minas subterrâneas são a NR 22, criada pela portaria nº 2037, em vigor desde 15 de dezembro de 1999, e as Normas Regulamentadora da Mineração, criadas pela portaria Nº237 de 18 de outubro de 2001. Estas normas buscam parâmetros mínimos e elementos necessários para o planejamento e desenvolvimento do sistema de ventilação.

De acordo com a NR 22 (1999) como forma de segurança e saúde ocupacional toda as atividades em subsolo devem dispor de sistema de ventilação mecânica que atenda os seguintes requisitos: a) Suprimento de oxigênio; b) Renovação contínua do ar; c) Diluição eficaz de gases inflamáveis ou nocivos e de poeiras do ambiente de trabalho; d) Temperatura e umidade adequadas ao trabalho humano; e) Operação de forma regular e contínua.

A NR 22 infere que nas regiões onde exista um fluxo de pessoas, trabalhando ou transitando é necessário fornecer no mínimo 19% de oxigênio ao fluxo de ar dessas áreas. O ar fresco em frente de trabalho deve ser de 2 m<sup>3</sup> por pessoal, garantindo assim um conforto térmico e a diluição de gases nocivos; para minas de carvão em especial são necessários 6 m<sup>3</sup> por pessoa, pois, os riscos relacionados a gases nocivos têm uma probabilidade maior de ocorrência, pela própria característica do minério. (NORMA REGULADORA NR 22, 1999)

### **4.2 Ventilação subterrânea**

McPherson (1993) afirma que a ventilação pode ser vista como o sangue vital de uma mina, sendo as vias de entrada as artérias que transportam o oxigênio para as áreas de trabalho e as veias, as vias de retorno que conduzem os poluentes para serem expelidos para a atmosfera externa. Sem um sistema de ventilação eficaz, nenhuma operação de mineração pode ocorrer de maneira segura para os trabalhadores que ali atuam.

Segundo Rodrigues (2014) os projetos de mineração devido a pressões dos mercados globais estão buscando a manutenção do padrão de ventilação exigido pela legislação. Esses

padrões de excelência são devidos a correta aplicação do dimensionamento do sistema de ventilação e sua correta implantação para, assim, obtermos a quantidade de ar necessária para a diluição dos subprodutos que satisfaça os padrões de segurança e saúde estabelecidos pela legislação. A aquisição de veículos, com menores índices de emissão de elementos particulados e gases, também se torna um ponto crucial na diminuição da quantidade de elementos nocivos que possam afetar a segurança do trabalho e os padrões estabelecidos como ideais para os mercados globais.

#### 4.2.1 Propriedades do ar

Segundo levantamentos realizados via aeronaves, sondas e satélites, a composição média do ar “limpo e seco”, contém os seguintes componentes: nitrogênio (N<sub>2</sub>), oxigênio (O<sub>2</sub>), argônio (Ar), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), neônio (Ne), hélio (He), metano (CH<sub>4</sub>), criptônio (Kr), hidrogênio (H<sub>2</sub>) e xenônio (Xe). A Tabela 1 representa a composição de um metro cúbico de ar “limpo e seco” (CUNHA, 2017).

Tabela 1: Composição média do ar limpo e seco.

<b>COMPOSIÇÃO MÉDIA DO AR LIMPO E SECO</b>	
<b>COMPONENTES</b>	<b>TEOR (POR METRO CÚBICO)</b>
Nitrogênio ( N <sub>2</sub> )	780,8 litros ( L )
Oxigênio ( O <sub>2</sub> )	209,5 litros ( L )
Argônio ( Ar )	9,3 litros ( L )
Gás carbônico ( CO <sub>2</sub> )	375 mililitros ( mL )
Neônio ( Ne )	18 mililitros ( mL )
Hélio ( He )	5,2 mililitros ( mL )
Metano ( CH <sub>4</sub> )	1,8 mililitros ( mL )
Criptônio ( Kr )	1,1 mililitros ( mL )
Hidrôgenio ( H <sub>2</sub> )	0,53 mililitros ( mL )
Xenônio ( Xe )	0,086 mililitros ( mL )

Fonte: Adaptado de Cunha (2017)

De acordo com (Frade, 2006):

*“Em cada instante o ar contido num qualquer local está sujeito à acção de cargas térmicas, internas e externas, que lhe provocam alterações da temperatura e do teor de vapor de água. As alterações das condições ambientais são provocadas pela acção de fontes internas, como por exemplo iluminação, pessoas, equipamentos, etc., por transmissão de calor através da envolvente do local: radiação através de superfícies transparentes, condução através de superfícies opacas, convecção nas superfícies exterior e interiores, tendo ainda de serem consideradas as eventuais infiltrações.”*

#### 4.2.2 Características do ar no interior das minas

Costa (2017) infere que nas galerias e frentes de trabalho o ar atmosférico ali presente, quando percorre o interior da mina, ocorre uma série de alterações químicas e físicas, provocando mudança na sua composição, levando a diminuição de oxigênio naquela região e normalmente acarretando no aumento de substâncias como anidrido carbônico, nitrogênio e vapor de 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.

Segundo Brasil (2020) pode-se caracterizar o ar presente nas galerias ou frentes de lavra, de duas maneiras: primeiramente o ar fresco que, segundo a NRM-06, é todo ar proveniente da adução da superfície que esteja adequada para respiração humana e utilização de máquinas. Este está próximo da composição aproximada a do ar atmosférico normal. De maneira contrária, temos o ar viciado, que é todo ar que foi utilizado para ventilar frentes de trabalho (lavra, serviços e desenvolvimento) e carrega consigo contaminantes, onde este é impróprio para respiração.

#### 4.2.3 Objetivos de um sistema de ventilação de mina

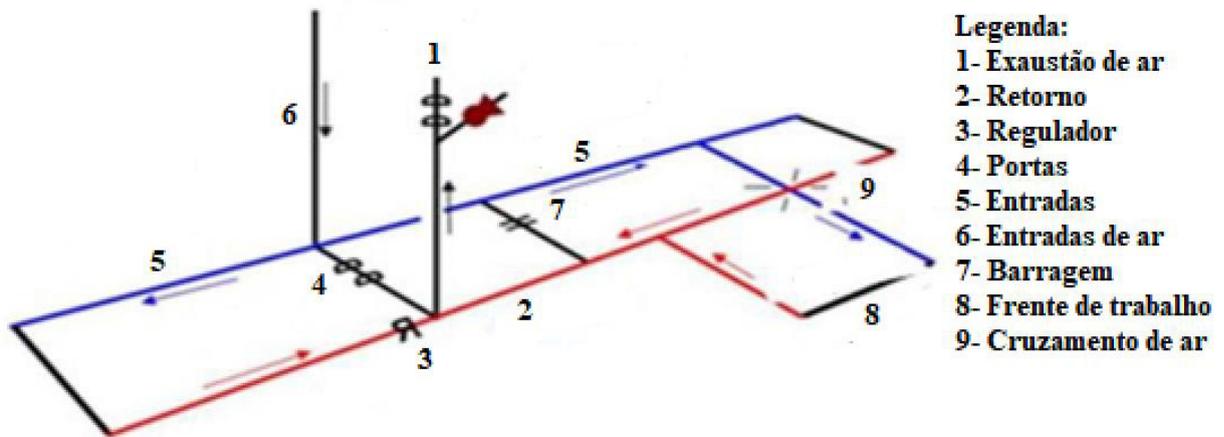
Segundo Costa (2017) o sistema de ventilação tem como função primária o fornecimento de fluxo de ar onde e quando se fizer necessário. Com a premissa de levar ar para as regiões necessárias. Se necessita, também, levar em consideração o nível de importância de cada situação, os quais, numa escala decedente de importância relativa, seriam: a) Fornecer ar para os trabalhadores na quantidade e qualidade necessárias; b) Fornecer a quantidade de ar necessária para diluir e tornar inofensivos gases tóxicos e explosivos; c) Fornecer ar com velocidade suficiente para remover da mina poeiras e gases; d) Controlar a umidade e temperatura do ar.

Cardoso (2014) relata que um sistema de ventilação instalado em uma mina subterrânea tem o objetivo de oferecer aos trabalhadores um ambiente de trabalho, onde os mesmos utilizam equipamentos durante a mineração, de forma que ainda se enquadre nos requisitos de segurança e de saúde ocupacional.

#### 4.3 Elementos de um Sistema de ventilação

Na mineração subterrânea a exploração de minérios se tornou cada vez mais complexa e profunda, em que faz-se necessário substituir o sistema de ventilação natural por métodos mecanizados que proporcionaram aos empreendimentos minerários atingirem profundidades elevadas (COSTA, 2017). Um destes métodos mecanizados para ventilação é o de insuflação que, segundo Costa (2019), tem o objetivo de levar ar limpo a mina e manter os níveis de oxigênio adequados (20,95% até 18%); contaminantes ali presentes devem ser diluídos; como consequência secundária, prover conforto térmico. Já a ventilação por exaustão tem por objetivo captar os poluentes que estejam o mais próximo da fonte e, como consequência secundária, otimizar a ventilação em geral. A seguir serão descritos todos os elementos que compõem um sistema de ventilação como resumido na figura 1.

Figura 1: Principais componentes de um sistema de ventilação (Adaptado de Mepherson, 1993)



#### 4.3.1 Ventilação principal e auxiliar

Para Acuña (2014) os sistemas de ventilação são divididos em duas categorias: Principal e Auxiliar. O sistema principal busca levar o ar fresco da superfície para as regiões de frente de trabalho e também retirar o ar contaminado das frentes para a superfície. No caso do sistema auxiliar, este é projetado para conduzir fluxos de ar de maneiras mais pontuais, onde é feito um circuito no qual será retirado das rotas aéreas primárias nas frentes de trabalho ativas, com o intuito de diluir os contaminantes. Após isso, o fluxo retorna para o circuito primário e posteriormente transportado para a superfície.

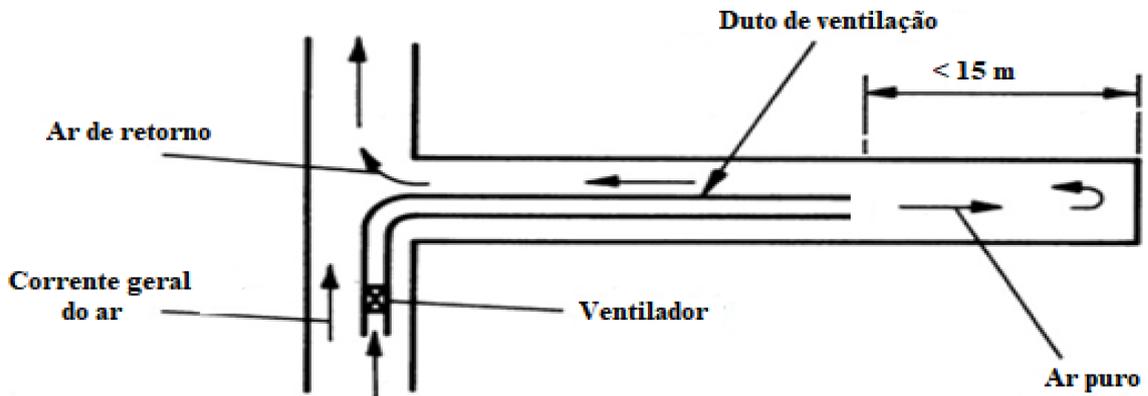
Segundo Costa (2019), mesmo que o fluxo geral de ar percorra a maioria das frentes de trabalho, teremos algumas regiões que este fluxo não chegará com eficiência, tais como, frentes de desenvolvimento, estações de carregamento de shaft, dentre outras. Nestes locais será necessária a utilização de uma ventilação auxiliar para suprir a demanda de ar adequada para aquele determinado local. Este tipo de ventilação requer um ventilador adicional e uma rota própria para o ar, que é geralmente conseguido mediante um duto de ventilação.

Costa (2017) define que a ventilação auxiliar pode apresentar em termos gerais três formas de aplicação.

- Soprante/insuflação que tem o objetivo de evitar que o ar contaminado da frente de desenvolvimento, seja recirculado. Para isto, devemos instalar o ventilador ao menos a 5m

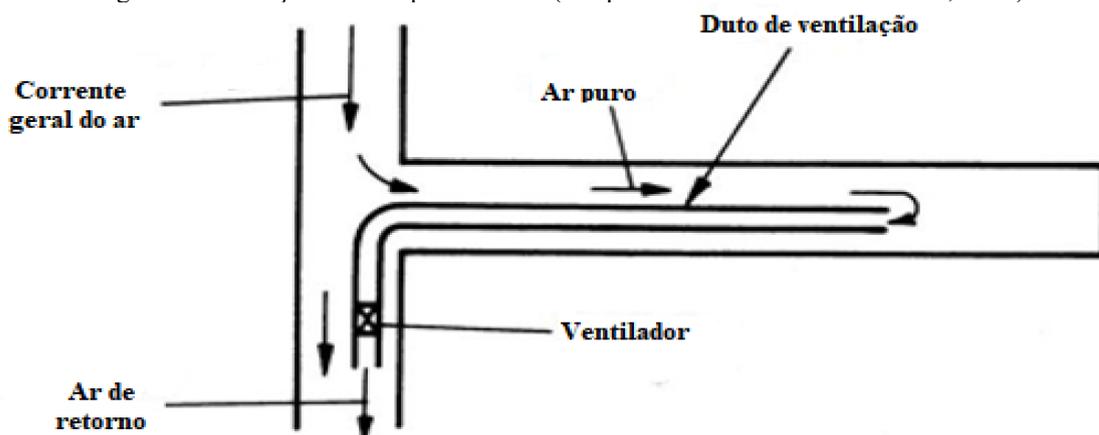
da entrada da galeria, que seja no sentido contrário à corrente de ar, onde, se o ventilador insuflar ar na frente de trabalho, este retornará à corrente principal, como mostrado na figura 2 .

Figura 2: Ventilação auxiliar soprante (Adaptado de VUTUKURI e LAMA, 1986).



- O sistema Aspirante/exaustão, da mesma maneira do soprante, tem como objetivo evitar que o ar contaminado permaneça na frente de trabalho e seja recirculado. A figura 3 ilustra que, quando o ar próximo da frente do desenvolvimento é aspirado através de um duto de ventilação, este é automaticamente substituído pelo ar puro exaurido da galeria. Para evitar a recirculação de ar, o local de descarga desse ar de retorno deve localizar-se ao menos a 5m da entrada de desenvolvimento.

Figura 3: Ventilação auxiliar por exaustão (Adaptado de VUTUKURI e LAMA, 1986).



- Sistema Misto (insuflação + exaustão) consiste em utilizar os dois tipos de sistema, sobrepondo um duto auxiliar soprante ao sistema aspirante ou um duto auxiliar aspirante ao sistema soprante, como pode se observar nas figuras 4 e 5 (BRASIL, 2020).

Figura 4: Ventilação auxiliar por exaustão com reforço soprante (Adaptado de VUTUKURI e LAMA, 1986).

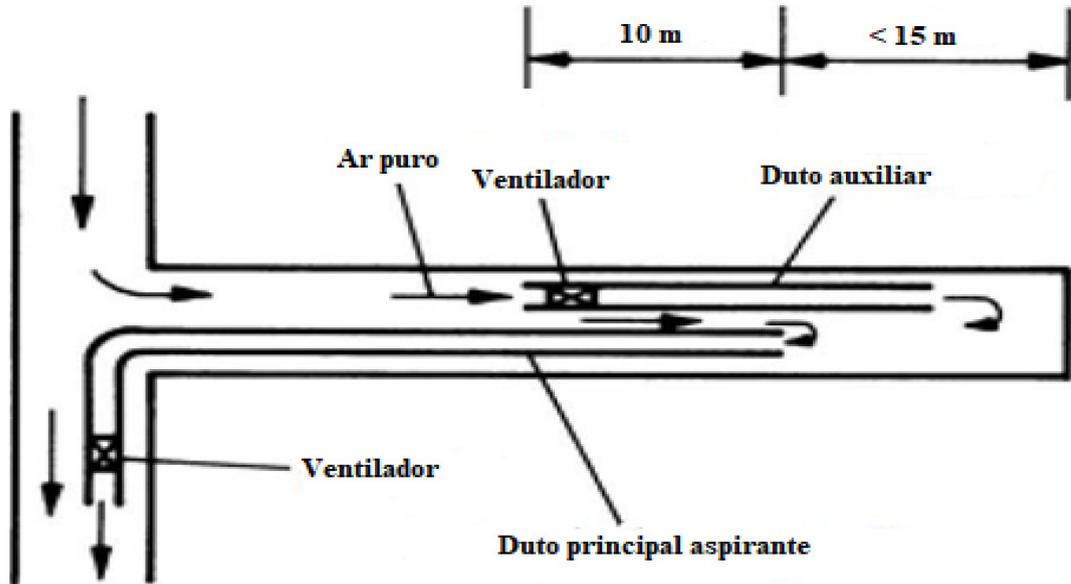
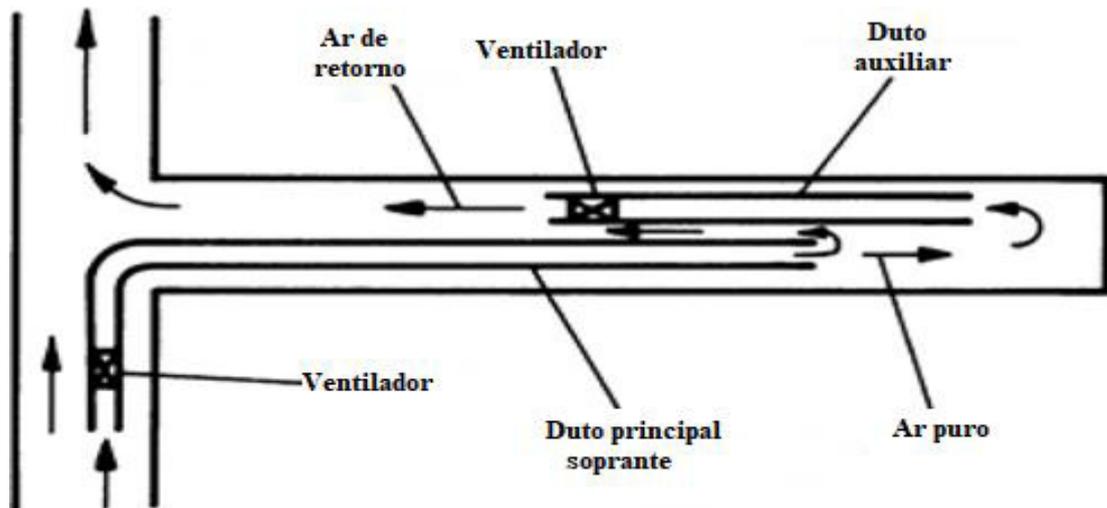


Figura 5: Ventilação auxiliar soprante com reforço por exaustão (Adaptado de VUTUKURI e LAMA, 1986).

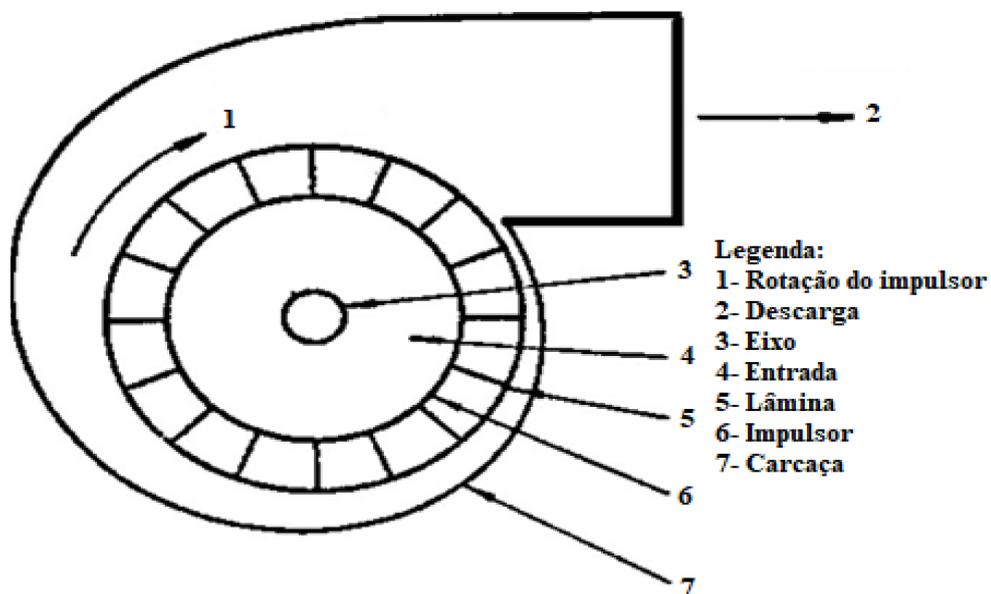


#### 4.3.2 Ventiladores centrífugos

Nos ventiladores centrífugos, o impulsor ou hélice, gira dentro de uma carcaça em forma de espiral, que coleta o ar através de uma ou duas aberturas localizadas respectivamente em um ou nos dois lados do impulsor. O ar coletado é canalizado e descarregado radialmente através do difusor. A figura 6 mostra um esquema dos elementos básicos de um ventilador centrífugo (VUTUKURI e LAMA, 1986).

Costa (2019) relata que são equipamentos nos quais o ar penetra na direção do rotor e é despejado radialmente. Sua aplicação em mina subterrânea se deve em casos de necessidade de pressões mais elevadas, visto que são ventiladores robustos, estes geralmente possuem menor necessidade de manutenção; em contrapartida são equipamentos de alto custo de aquisição e não permitem ajuste do passo. São indicados para grandes depressões totais: 1000 mm a 1500 mm de coluna de água.

Figura 6: Elementos básicos de um ventilador centrífugo (Adaptado de VUTUKURI e LAMA, 1986).



#### 4.3.3 Ventiladores axiais

Costa (2019) afirma que os ventiladores axiais são os mais comercializados, visto que, se trata de um equipamento que permite ajuste de ângulo de ataque das pás (passo) do rotor, assim podendo controlar a vazão do fluxo de ar, proporcionando uma maior versatilidade deste equipamento para as diversas variáveis que podem ser necessárias em uma operação mineira em mina subterrânea, conforme mostrado na figura 7.

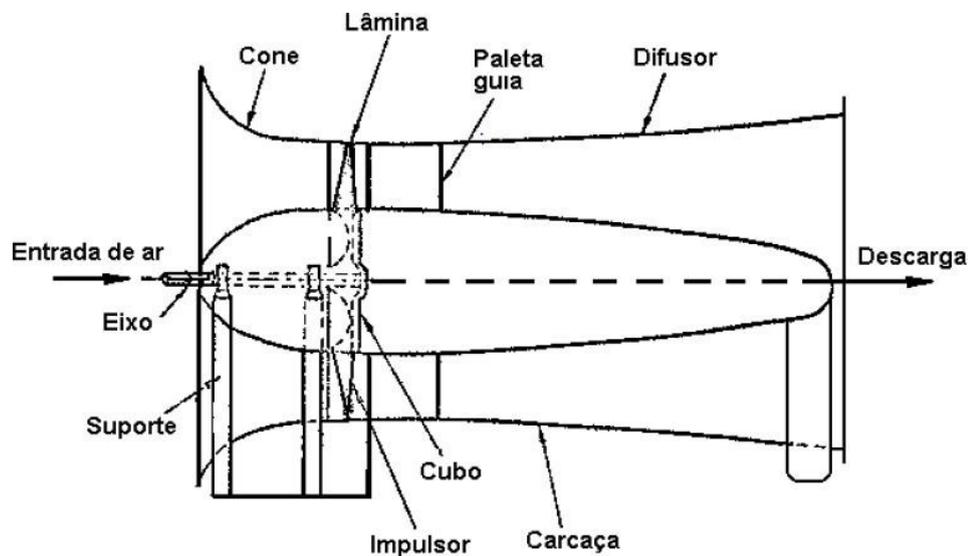
Costa (2019) demonstra a desvantagem dos ventiladores axiais em relação aos centrífugos:

*“Quando operam em altas pressões: há uma zona de instabilidade de funcionamento em sua*

*curva característica pressão x vazão, além da redução de eficiência, há uma tendência de aumento da vibração no rotor, causando desgaste prematuro de peças.”*

A carcaça de um ventilador de fluxo axial consta, além da secção cilíndrica que envolve o impulsor, de um cone de entrada e um difusor, que servem para reduzir as perdas de pressão por choque na entrada e descarga do ar. A figura 7 mostra os principais elementos de um ventilador de fluxo axial. Alguns ventiladores possuem dois ou três impulsores, colocados em série, cada um com suas próprias paletas guias, sendo chamados por isso, ventiladores de dois ou três estágios (VUTUKURI e LAMA, 1986).

Figura 7: Elementos básicos de um ventilador axial (VUTUKURI e LAMA, 1986).



#### 4.3.4 Reguladores

Segundo Cardoso (2014) os reguladores são sistemas que utilizam orifícios com abertura ou fechamento regulável, conforme a necessidade de ventilar uma seção da mina. Para o funcionamento desse sistema são instaladas portas com persianas ou com painel de correr. Com isso, o fluxo de ar da seção onde foi instalado o regulador pode ser controlado. Esses equipamentos podem ser manipulados de forma manual ou automática, sua atuação irá ocorrer a partir do monitoramento da vazão de ar. Na figura 8 (a) é mostrado um modelo de regulador.

No mercado de mineração existe uma gama de marcas que produzem reguladores, uma delas é a Minova, uma empresa Australiana que produz o equipamento denominado *Blastflow*

*Regulator*, como visto na imagem 1, projetado para ser facilmente regulado. Os módulos reguladores desse equipamento podem ser pré-ajustados para qualquer posição, de totalmente aberto a totalmente fechado, utilizando um mecanismo de ajuste de roda. Uma instalação que tenha um módulo duplo pode regular até 50m<sup>3</sup> por segundo de ar, que é adequado para a maioria das minas que requisitam esse serviço. Para permitir o controle do fluxo de ar, ventiladores secundários podem ser utilizados como reguladores de fluxo.

Imagem 1: Conjunto de blastflow regulators da empresa Minova.



Fonte: Minova

#### 4.3.5 Portas

São instaladas para evitar que as correntes de ar não tenham seus fluxos alterados. Para isto, são aplicadas, geralmente, duas portas com um determinado espaço entre elas. Quando uma porta for aberta a outra permanece fechada, assim evitando a mudança do fluxo de ar. Este processo tem o intuito de evitar que o fluxo de retorno e o de ar fresco se cruzem e que não ocorra mudança de sentido. As portas sempre se abrem no sentido da maior pressão. Deste modo, estas realizam o auto fechamento e garantem o sentido da vazão do ar. Na figura 8 (b) é mostrado um modelo de Portas (CARDOSO, 2014).

#### 4.3.6 Barragens

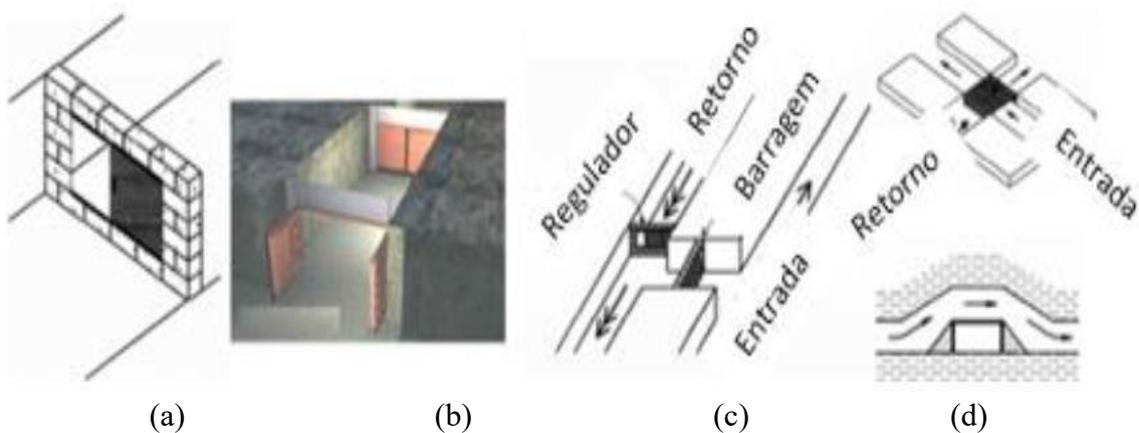
São instaladas quando uma seção da mina se encontra totalmente exaurida. Sendo assim, se torna desnecessário que o fluxo de ar seja mantido para aquele setor. As barragens são construídas de alvenaria, madeira ou de aço, proporcionando o fechamento completo. As barragens não servem apenas para impedir que o fluxo de ar seja utilizado em frentes desnecessárias, também possuem a função de impedir que gases tóxicos provenientes da rocha sejam liberados, impedindo a contaminação em outras seções da mina. Na figura 8 (c) é demonstrado um modelo de Barragem (CARDOSO, 2014).

#### 4.3.7 Cruzamento de ar

É uma região onde o fluxo de ar de entrada se cruza com o fluxo de ar de retorno. Neste cruzamento é construída uma passagem para que os fluxos não se misturem, assim, evitando que o ar que atinja as frentes não traga consigo alguma contaminação proveniente do ar de retorno (CARDOSO, 2014).

Os cruzamentos de ar são onde ocorrem as maiores perdas de fluxo de ar. Estas perdas são inevitáveis devido às características de um cruzamento. Desta forma, um bom desenvolvimento de um cruzamento se torna essencial para minimizar a quantidade de perdas, como também, reduzir custos do processo de ventilação. Na figura 8 (d) é mostrado um modelo de Cruzamento de ar (COSTA, 2019).

Figura 8 : (a) Modelo de regulador, (b) modelo de portas, (c) modelo de barragem, (d) modelo de cruzamento de ar. (Fonte: Division of Mines, 2004)



#### 4.4 Ventilação sob demanda (VOD)

Por meio de pesquisas da área de ventilação subterrânea, percebe-se que a ventilação de minas subterrâneas apresenta elevado consumo de energia elétrica e, com o intuito de diminuir esses custos, as empresas buscam alternativas. Uma destas é a VOD (ventilação sob demanda), onde, em busca de diminuir o custo energético, as minerações aplicam a ventilação apenas em regiões de interesse e regulando a quantidade adequada para cada setor (COSTA, 2019).

Segundo Costa et al. (2019), a VOD (ventilação sob demanda) tem como objetivo aumentar a produção de um projeto de mineração e economizar energia, controlando de forma mais efetiva o fluxo de ar, respeitando as normas regulatórias, se apresentando como um artifício que irá otimizar e automatizar os processos de ventilação subterrânea.

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

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

#### 4.5 Custos de ventilação

De acordo com estudos, os sistemas de ventilação chegam a corresponder a 40% do consumo de energia elétrica e a 60% do custo operacional de uma mina subterrânea, tendo como

uns dos principais responsáveis por esses custos os ventiladores, pelo seu alto consumo de energia, que pode ser melhor exemplificado na tabela 2. (Chatterjee, Zhang e Xia, 2015).

O Programa da Indústria Canadense para Conservação de Energia (CIPEC), estudou 11 minas de minerais metálicos (ouro, cobre e chumbo/zinco), onde levantaram o consumo energético e os custos envolvidos em todas os setores do ciclo de operação de uma mina subterrânea. Na média, a ventilação de uma mina subterrânea corresponde a cerca de 33% dos custos do projeto e a cerca de 42% do consumo energético. Esses dados são mostrados na tabela 2.

Para Filho (2021) o principal objetivo dos estudos de otimização de uma rede de ventilação de minas é suprir uma demanda por melhorias tecnológicas nos processos associados à mineração, com o intuito de estabelecer métodos que controlem um sistema ,de ventilação, e por meio disto, diminuir os custos de um sistema de ventilação em minas subterrâneas.

Tabela 2 : Consumo de energia e custo por tonelada para ventilação presente no ciclo da mineração subterrânea, estudo realizado em minas no Canadá.

Ventilação							
Custo ( \$ )			Consumo de energia (KW.h)			Representatividade	
Mínimo	Máximo	Médio	Mínimo	Máximo	Médio	Custos	Energia
1,11	2,92	2,02	27,90	55,31	41,61	32,79%	41,85%

Fonte: Chatterjee, Zhang e Xia, 2015

#### 4.6 Arduino

Segundo Gonçalves (2018) a Internet of Things (IoT), pode ser entendida como uma rede de objetos físicos que possuem tecnologia embarcada com uma rede capaz de coletar e transmitir dados. A internet das coisas surgiu como uma proposta nova capaz de promover a integração de diversos objetos a sistemas computacionais, com o intuito de gerar maior eficiência por meio da automação de diversas atividades humanas.

Arduino UNO é uma placa microcontroladora baseada no ATmega328P. Possui 14 pinos de entrada/saída digital (dos quais 6 podem ser usados como saídas PWM), 6 entradas analógicas, um ressonador cerâmico de 16MHz, uma conexão USB, um conector de alimentação, um conector ICSP e um botão de reset. Este contém tudo o que é necessário para dar suporte ao microcontrolador; basta conectá-lo a um computador com um cabo USB ou alimentá-lo com um adaptador AC-to-DC ou bateria para começar (ARDUINO.CC,2022).

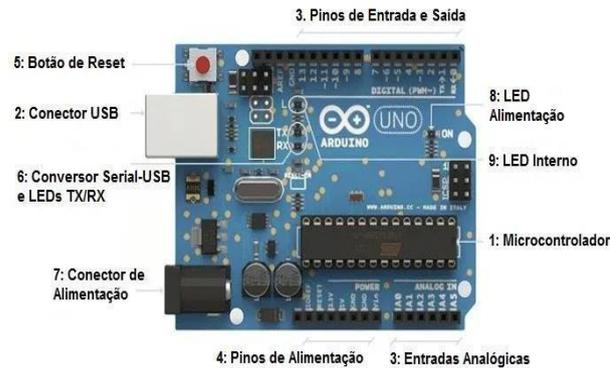
O Arduino é um equipamento que se comporta como um pequeno computador para processar comandos de entrada e saída de dispositivos que são conectados ao mesmo. Sua interação ocorre tanto via hardware, como na aplicação de sensores de pressão, temperatura, distância e receptores de GPS etc., como software, que é a parte da programação que direciona os comandos para os equipamentos. Tendo em vista que a gama de aplicação pode ser muito ampla e com um grau de liberdade de ideias elevado (MCROBERTS,2011).

Segundo Oliveira (2020) o Arduino tem o objetivo de integrar hardware e software de maneira mais simples, para pessoas que não possuam alto conhecimento na área poderem desenvolver projetos, que necessitem de habilidades em eletrônica básica e programação. As placas de Arduino são equipamentos capazes de ler várias variáveis físicas, como entradas para sensores, ligar uma luz ou um LED, etc. Em sua composição existe um microcontrolador na placa, permitindo envio de linhas de comando, para assim inferir como o equipamento deve atuar, o que fazer e como fazer.

#### 4.6.1 Componentes básicos do Arduino

A estrutura do Arduino é formada por: Microcontrolador que tem a função de controlar e manipular as portas de entrada e saída e também processar o software; Conector USB: é onde ocorre a conexão da placa ao computador, através deste conector é que conseguimos mandar os comandos da programação utilizados para dentro do circuito; Pino de Entrada de Saída de dados: é a parte onde a placa se comunica com o ambiente externo. Esta comunicação ocorre por 14 portas digitais, 6 pinos de entrada analógica e 6 pinos de saída analógica; Pinos de alimentação: são instrumentos capazes de energizar os componentes dos projetos, distribuindo diversos valores de tensão; Botão Reset: tem a função de resetar a placa e reiniciar o processo; Conversor serial-USB e LED TX/RX: é encarregado em interligar o microcontrolador o computador, utilizando um chip que traduz a comunicação de um para o outro, nesse processo quando ocorre uma transmissão ou recepção o LED Tx/Rx acenderá para indicar realização do comando; Conector de Alimentação: recebe a fonte de alimentação externa, com tensões que vão de 7 a 20 volts e uma corrente mínima de 300 mA; LED de Alimentação: indica se a placa está energizada; LED Interno: estará conectado ao pino digital. Esses componentes podem ser melhor visualizados na figura 9 (OLIVEIRA, 2020).

Figura 9 : Componentes do Arduino UNO.



Fonte: Adaptado de Vidadesilicio.com.br

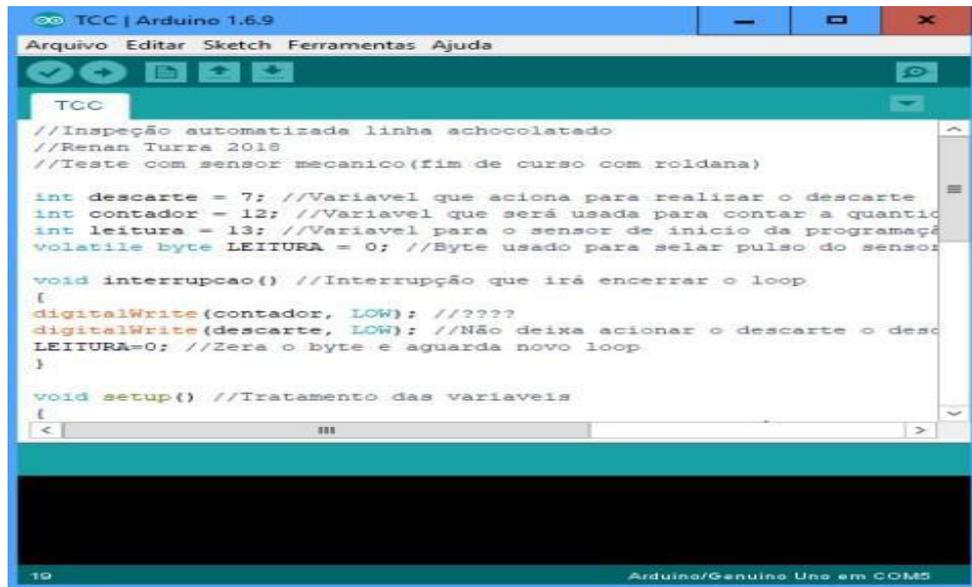
#### 4.6.2 Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE)

Este software busca auxiliar e agilizar o processo de desenvolvimento de software reunindo características e aplicações, combinando diferentes funcionalidades em uma única interface gráfica do usuário. O IDE utiliza a técnica RAD (Rapid Application Development), onde irá permitir que os desenvolvedores tenham suas aplicações de forma mais rápida e com um maior aproveitamento. Assim, o processo de desenvolvimento de códigos será mais alinhado e definido, deixando o processo mais fácil e rápido. É integrado por envolver pelo menos, editor, compilador e depurador (SEBESTA, 2000).

O IDE aplicado em Arduino pode ser utilizado em sistemas como Windows, Linux, dentre outros, isto é, se trata de um equipamento multiplataforma. Também apresenta um fácil uso, tanto para iniciantes, quanto para usuários de nível elevado. Utiliza a programação Processing que é uma linguagem mais simples, além de ser open source, ou seja, o código é aberto. Desta forma o usuário pode modificar e distribuir o software sem nenhum problema. As placas do Arduino estão sob licença da Creative Commons, permitindo a criação de novas versões do módulo, estendendo-o e aprimorando-o (OLIVEIRA, 2020).

O processo de esquematização do IDE tem o intuito de introduzir a programação a pessoas não familiarizadas com o desenvolvimento de software. Inclui um editor de código com recursos de realce de sintaxe, parênteses correspondentes e identificação automática, sendo capaz de compilar e carregar programas para a placa com um único clique, como exposto na figura 10. Com isso não há necessidade de editar Makefiles ou rodar programas em ambientes de linha de comando. Na figura podemos perceber um exemplo de um ambiente de desenvolvimento Arduino (SEVERO, 2012)

Figura 10 : Ambiente de desenvolvimento (TURRA, 2018)



```
TCC | Arduino 1.6.9
Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda
TCC
//Inspeção automatizada linha achocolatado
//Renan Turra 2018
//Teste com sensor mecanico(fim de curso com roldana)

int descarte = 7; //Variavel que aciona para realizar o descarte
int contador = 12; //Variavel que será usada para contar a quantidade
int leitura = 13; //Variavel para o sensor de inicio da programação
volatile byte LEITURA = 0; //Byte usado para selar pulso do sensor

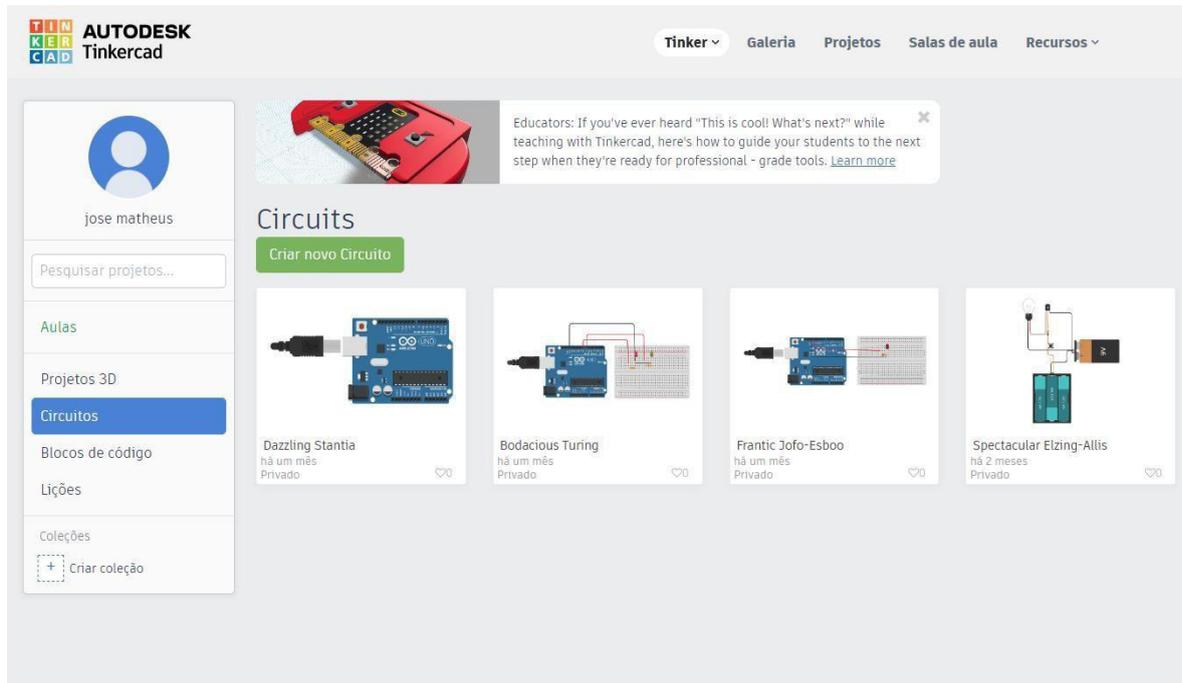
void interrupcao() //Interrupção que irá encerrar o loop
{
  digitalWrite(contador, LOW); //????
  digitalWrite(descarte, LOW); //Não deixa acionar o descarte o descarte
  LEITURA=0; //Zera o byte e aguarda novo loop
}

void setup() //Tratamento das variaveis
{
  <
  >
```

#### 4.6.3 Tinkercad

O Tinkercad é um software que pertence a empresa AUTODESK, que desenvolve simulação com base em navegador web e aplica perfeitamente às funções desenvolvidas pelo Arduino, assim sendo possível desenvolver testes sem a necessidade de dispor dos componentes físicos, nem de instalação de aplicativos. Sua interface é intuitiva facilitando a programação dos comandos para o Arduino, como demonstrado na figura 11, pode ser utilizado não só para circuitos, mas também para o desenvolvimento de modelagens em três dimensões. A programação é desenvolvida por meio de blocos que são interligados uns aos outros de forma que os passos necessários se formam para a execução do projeto. No Tinkercad é possível desenvolver um circuito sem a necessidade de utilizar códigos, basta apenas interligar as funcionalidades que estão na interface apenas por meio do “arraste” assim ativando os comandos. A utilização de comandos por meio de códigos também é possível, sendo indicada para circuitos mais complexos, onde fazê-lo de forma manual se tornaria muito desgastante (ALCÂNTARA, 2018).

Figura 11: Ambiente Tinker ( Autodesk Tinkercad, 2022)



#### 4.6.4 Sensores e atuadores

Os sensores podem ser classificados como ativos ou passivos. Sensor passivo é aquele que não precisa de fonte de energia adicional, este consegue gerar diretamente um sinal elétrico em resposta a um estímulo externo, isto é, a energia de estímulo na entrada é convertida pelo sensor em um sinal de saída. Os sensores ativos exigem uma fonte externa para sua operação, adotado como sinal de excitação. Esse sinal é utilizado pelo sensor para produzir o sinal de saída (MAZZAROPPI, 2007).

Para WOLF et al., 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 (odometria), e os sensores extraceptivos ou exteroceptivos, que obtêm as informações do ambiente que rodeia o robô, como o GPS, sonar e câmera, que lhe permitem obter informações de localização.

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.

## 4.7 Trabalho Relacionado

Sobre a internet das coisas, por se tratar de uma tecnologia recente, viu-se, a partir de pesquisa bibliográfica, que ainda não existe uma quantidade elevada de matérias, TCC's, artigos, monografias, principalmente no setor mineral onde de maneira geral as empresas buscam manter suas novas aplicações, tecnologias em sigilo, disponibilizando poucas informações. Assim os poucos materiais encontrados são de grande relevância para o desenvolvimento desse projeto.

### 4.7.1 Simulação e maquetes em práticas pedagógicas como método de aprendizagem: lavra subterrânea

Esse projeto foi realizado com o intuito de promover um método pedagógico que promovesse uma maior interação dos discentes com a matéria apresentada com um modelo que foi chamado de “mão na massa”, em que alunos, por meio da construção de maquetes, tiveram um maior impacto no processo de aprendizagem, principalmente nas cadeiras de lavra subterrânea e condicionamento de mina do curso de engenharia de minas, visto que, possibilita uma maior dinâmica na passagem dos conteúdos, despertando um maior interesse dos alunos nas problemáticas que podem ser demonstradas na replicação de cenários de métodos de lavra subterrânea, podendo, por meio das maquetes, contextualizar bem esses métodos.

Foi desenvolvido um sistema de ventilação que apresentou parâmetros que propiciaram simular vários cenários que sejam os mais próximos possíveis da realidade, permitindo estudos de fluxo de ar em diversos campos e analisando seu comportamento em uma planta piloto que posteriormente pode ser aplicada em ambientes reais. A leitura dos dados se dá através do Arduino mega que permitiu a obtenção de valores fornecidos pelos sensores instalados (temperatura, pressão e umidade do ar) ao longo do circuito. Os sensores foram instalados em cada segmento do sistema de ventilação. A haste do anemômetro é posicionada no furo e inicia as leituras contínuas por um minuto em cada furo. O equipamento possui uma função que calcula a média naquele período de leitura. A programação no microcontrolador permite determinar a periodicidade das leituras dos sensores e posteriormente faz o cálculo da média em cada ponto.

Este trabalho especificou a necessidade de monitoramento dos fluxos, e a partir desses estudos definiram-se regiões em que se deve aplicar uma atenção especial e assim utilizar essas ferramentas como guia na tomada de decisão para corrigir ou evitar possíveis problemas,

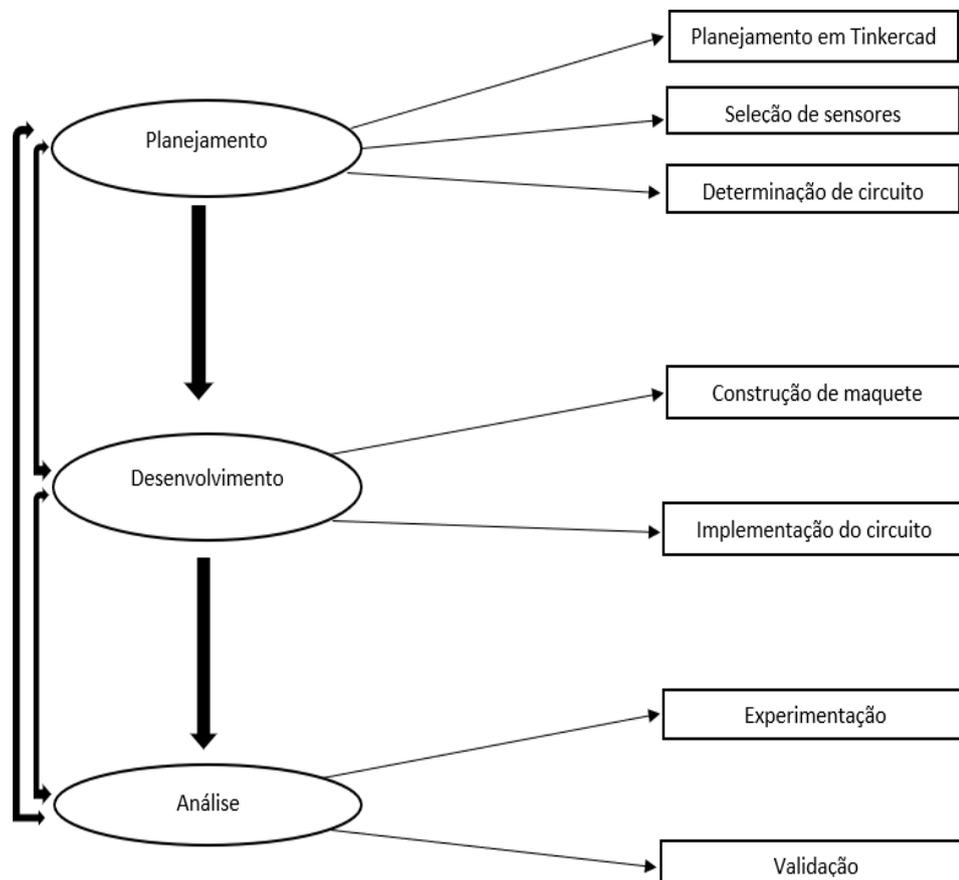
garantindo um bom desempenho e qualidade do sistema de fluxo de ar em uma possível aplicação em escala real.

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse projeto foram utilizados uma série de materiais que buscam sempre ser acessíveis e de baixo custo, dessa forma se é capaz de gerar um projeto que tenha a capacidade de ser copiado para fins acadêmicos em outras instituições de ensino.

As etapas da metodologia foram executadas conforme o fluxograma demonstrado na figura 12 e explicados nos tópicos que se seguem.

Figura 12 : Fluxograma representativo das etapas da metodologia proposta.



Fonte: Autor, 2022

### 5.1 Construção da maquete do sistema anemômetro/regulador

O planejamento e desenvolvimento da maquete que simula o arranjo de um sistema de galerias subterrânea, onde a maquete simula um fluxo de ar, que atravessa um regulador e que trafega no interior de dutos de ventilação, leva em consideração materiais acessíveis a nossa realidade e prioriza aqueles objetos que fossem advindos de reciclagem para assim dar um destino acadêmico para esses materiais. O custo de implantação desse projeto foi de R\$184,00, os materiais utilizados no desenvolvimento deste protótipo foram descritos na tabela 3.

Tabela 3: Materiais utilizados na construção do protótipo proposto neste trabalho.

<b>MATERIAIS</b>		
<b>Nome</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Custo</b>
Tubo PVC de 75mm	1,0 m	R\$ 15,00
Cola quente	6 und	R\$ 6,00
Ventoinha	1 und	R\$ 0,00
Rolamentos	2 und	R\$ 11,00
Servo Motor 9g Sg90	1 und	R\$ 21,00
Fibra de Vidro	0,40 cm	R\$ 0,00
Papelão	0,5 m <sup>2</sup>	R\$ 0,00
Plástico ABS	0,10 m <sup>2</sup>	R\$ 0,00
Arduino	1 und	R\$ 55,00
Jumper Macho/Femea	6 und	R\$ 10,00

Jumper Macho/Macho	1 und	R\$ 2,00
Proto-board	1 und	R\$ 15,00
Display led 16 pinos	1 und	R\$ 40,00
Sensor de velocidade encoder 5mm	1 und	R\$ 9,50
TOTAL		184,50

## 5.2 Integração da maquete com a placa Arduino

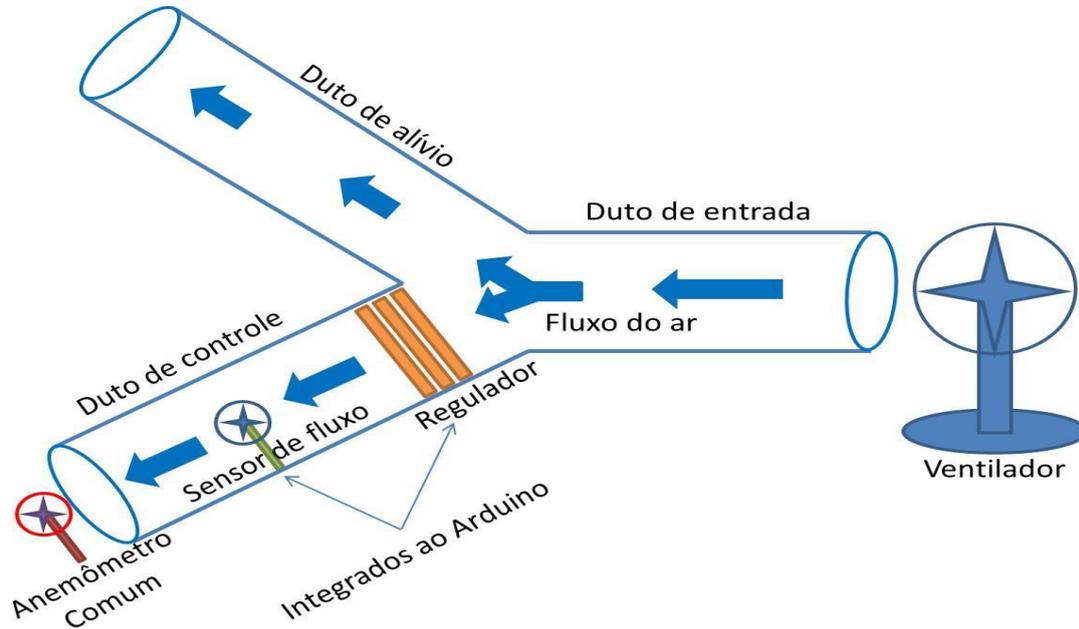
Na maquete que foi construída, foram instalados sensores para medição do fluxo de ar e o atuador, que irá controlar este fluxo a jusante do regulador, como pode ser visto na figura 13. O sensor do de fluxo de ar foi instalado de forma que quando houver a falta ou excesso de fluxo de ar nos pontos de monitoramento, este irá coletar o dado e mandará essa informação para o Arduino que entenderá esta necessidade de atuação e enviará o comando para o regulador. Desta forma abrindo ou fechando orifícios, permitindo um maior ou menor fluxo. Até que o fluxo naquele ponto esteja de acordo com o requerido.

## 5.3 Validação do sistema anemômetro/regulador

A validação do sistema anemômetro/regulador foi realizada da seguinte forma: ajustadas as velocidades do ventilador gerador do fluxo de ar na entrada dos dutos da maquete, estes irão percorrer os dutos e permearam o regulador e, por conseguinte, o medidor do fluxo de ar. Este medidor irá enviar a informação para a Placa Arduino Uno que, de acordo com a velocidade do fluxo, irá enviar um comando para abrir ou fechar o orifício do regulador. A operação de medição e atuação será executada em modo de *Looping*, ou seja, de forma contínua, até que o fluxo requerido naquele ponto de medição seja conseguido. O monitoramento das vazões será executado através do próprio medidor de velocidade do ar que emitirá esta informação para um computador que gerará a curva de fluxo de ar versus tempo, para que seja possível inferir qual o intervalo de tempo necessário para o sistema atuar no que se propõe. Um anemômetro comum também será utilizado para verificar a real velocidade em pontos

específicos do sistema construído para atestar sua eficácia e precisão.

Figura 13 : Modelo da maquete do projeto.



Fonte: Autor,2022

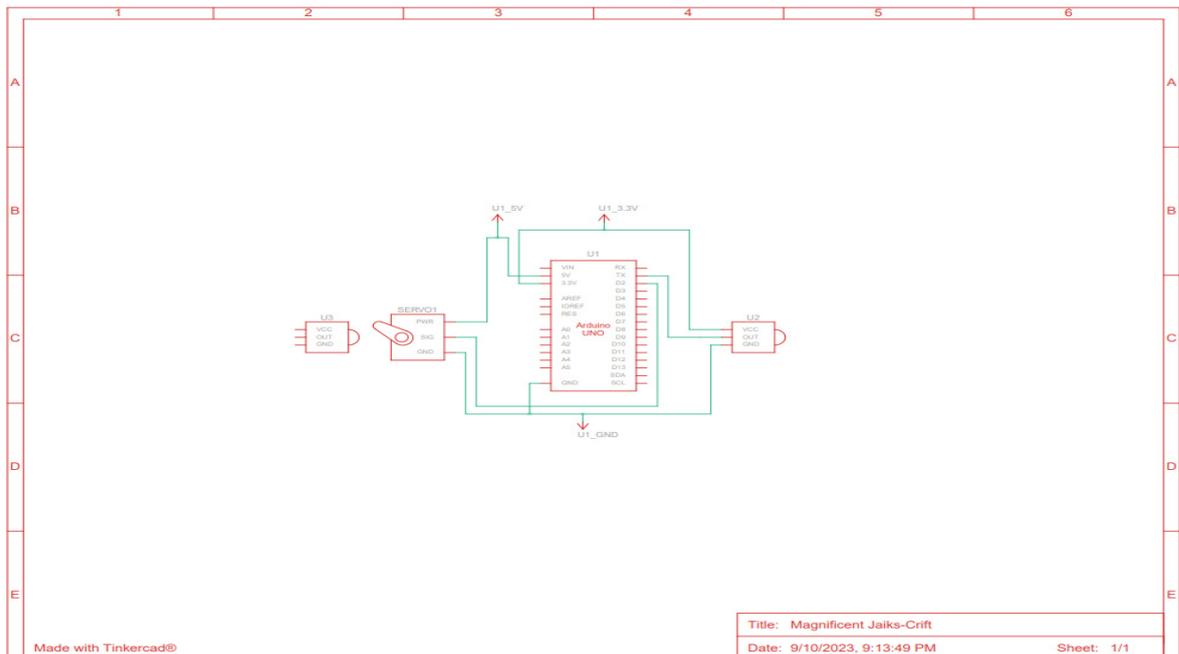
## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico serão demonstrados e esclarecidos todos os dados e informações que foram coletadas no decorrer desse projeto, como foram aplicados os equipamentos e demonstrar que esses dados tornam esse projeto viável para fins acadêmicos, respeitando o meio ambiente, como também possui aplicabilidade para fins de implantação em ambientes reais.

### 6.1 Circuito planejado em Tinkercad

Em ambiente tinkercad foram feitas a seleção de sensores mais indicados para a referida aplicação e o planejamento do sistema. Neste software se fez possível inferir de maneira prévia como funcionará a utilização do Arduino Uno em conjunto com os sensores. Também foi possível verificar se os comandos da programação processing, a programação utilizada pelo IDE, seriam aplicáveis ao modelo que será utilizado para a construção da planta piloto, conforme a figura 14.

Figura 14 : Modelo de circuito planejado em Tinkercad.



Fonte: Autor, 2023

## 6.2 Construção da maquete

Na execução das etapas deste trabalho, a construção do protótipo em Arduino, foi desenvolvido um regulador autônomo de fluxo de ar capaz de manter determinada velocidade em certos pontos de dutos de ventilação em um protótipo que simula uma mina subterrânea, que possua uma boa precisão e eficácia, e que seja robusto, pois a intenção é que seja aplicável para ambientes reais de mineração subterrânea, levando em consideração a utilização dos seguintes materiais que, se seguem, logo abaixo:

- Tubo PVC de 75mm : é um tipo de tubulação feito de Policloreto de Vinila (PVC). Por ser um plástico resistente e durável e por apresentar uma facilidade de aplicação, esses tubos são fabricados em diferentes diâmetros (BEVILACQUA,2006). Esse projeto teve o papel de representar galerias subterrâneas onde o fluxo de ar produzido percorrerá. O mesmo material também serviu como as paletas utilizadas para o regulador.

Imagem 2 : Tubos PVC 75mm..



Fonte: Autor, 2023

- Pistola de cola quente : foi utilizada para fixar os componentes empregues para a construção do protótipo, sendo escolhida para esta função por apresentar uma grande versatilidade e tendo a capacidade de se aderir a todos os materiais utilizados neste projeto.

Imagem 3 : Pistola de cola quente.



Fonte : Autor, 2023

- Ventoinha: foi utilizada na construção do anemômetro do projeto prototipagem de anemômetro em plataforma arduino, com a função de medir a velocidade do fluxo, sendo capaz de se conectar ao sistema arduino (Oliveira, 2022).

Imagem 4: Ventoinha.



Fonte: Autor, 2023

- Rolamentos: foram utilizados com o intuito de diminuir o atrito do sistema anemômetro e, assim, produzir um mecanismo que apresente resultados com uma menor margem de erro (Oliveira, 2022).

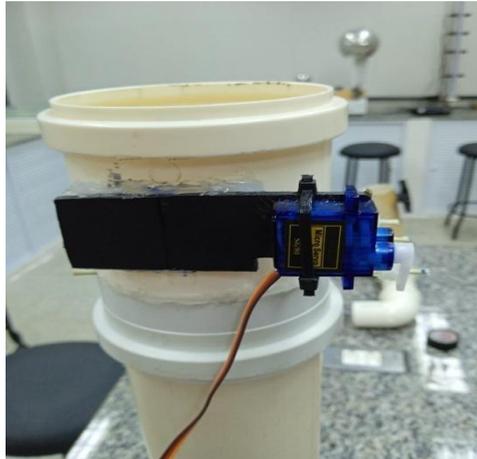
Imagem 5 : Rolamentos.



Fonte: Autor, 2023

- Servo Motor: é um dispositivo usado para controlar o movimento ou a posição de um mecanismo. Neste caso, foi utilizado para controlar o movimento do regulador. É um equipamento composto por um motor acoplado a um sistema de engrenagens e capaz de girar em um ângulo específico (TOMASCHITZ, 2013).

Imagem 6 : Servo Motor.



Fonte: Autor, 2023

- Fibra de vidro: que é um material composto por filamentos de vidro finos, foi utilizado como hastes fixadas nas paletas do regulador por ser um material resistente, leve e com alta durabilidade.

Imagem 7: Fibra de vidro.



Fonte: Autor, 2023

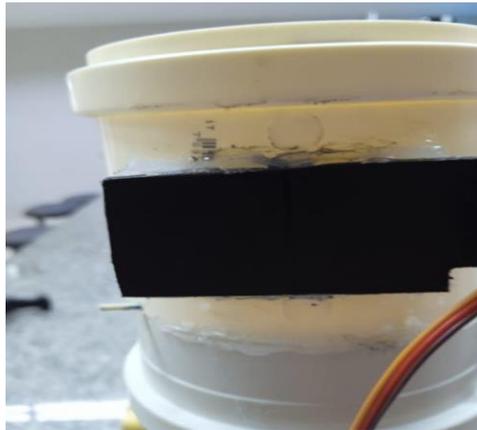
- Papelão: Foi utilizado como suporte do sistema de ventilação por ser um material de fácil acesso e muito versátil.

Imagem 8: Papelão.(Fonte: Autor,2023)



- Plástico ABS: é um material versátil e resistente, com propriedades mecânicas e térmicas favoráveis, o que o torna adequado para diversas aplicações. Neste projeto foi utilizado como suporte do servo mecânico (GEDEL PLÁSTICO, 2023) .

Imagem 9 : Plástico ABS.



Fonte: Autor, 2023

- Arduino: foi empregado neste projeto por apresentar alta flexibilidade e um baixo custo de aquisição, como também apresenta uma linguagem de programação acessível para iniciantes e voltada para integração do arduino com outras tecnologias . (SEBESTA, 2000)

Imagem 10 : Arduino.



Fonte: Autor, 2023

- Jumper: são utilizados para estabelecer conexões temporárias ou para interligar componentes eletrônicos que estão próximos um do outro. Eles permitem uma conexão rápida e fácil, evitando a necessidade de conexão ou uso de outros métodos de conexão permanentes (BARUSSO, 2022).

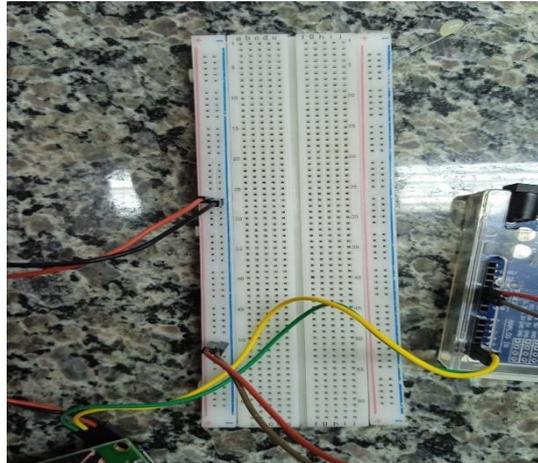
Imagem 11 : Jumper.



Fonte: Autor, 2023

- Proto-board: consiste em uma placa com uma matriz de furos condutores, geralmente organizados em linhas e colunas. Os furos são interconectados eletricamente por trilhas metálicas que ficam abaixo da superfície da placa. Essas trilhas permitem que os componentes sejam inseridos e conectados entre si de forma rápida e flexível (BARUSSO, 2022).

Imagem 12 : Proto-board



Fonte: Autor, 2023

- Display led 16 pinos: também conhecido como painel LED, é um tipo de equipamento de exibição que utiliza diodos emissores de luz (LEDs) para formar imagens e exibir informações. Nesse projeto, foi utilizado para exibir a velocidade de fluxo naquele ambiente que servirá como informação para se automatizar o sistema (BARUSSO, 2022).

Imagem 13 : Display led 16 pinos.



Fonte: Autor, 2023

- Sensor de velocidade encoder 5mm: Um sensor de velocidade encoder de 5 mm é um dispositivo usado para medir a velocidade de rotação ou deslocamento linear de um objeto. O termo "encoder" refere-se ao componente responsável por converter o movimento em um sinal elétrico correspondente (NASCIMENTO, 2018).

### 6.3 Calibragem de RPM para m/s

O processo de calibragem teve o intuito de minimizar os erros associados ao processo de montagem desse protótipo, levando em consideração que o desenvolvimento não era industrial, com a utilização de equipamentos acessíveis e com garantias de reaproveitamento. Para mitigar esses erros, foi necessária a utilização de um anemômetro comercial como fonte de dados confiáveis, gerando uma tabela de dados em m/s e em seguida foi realizada a coleta de dados em RPM utilizando o protótipo de anemômetro em arduino, que podem ser observados na tabela 4, logo abaixo .

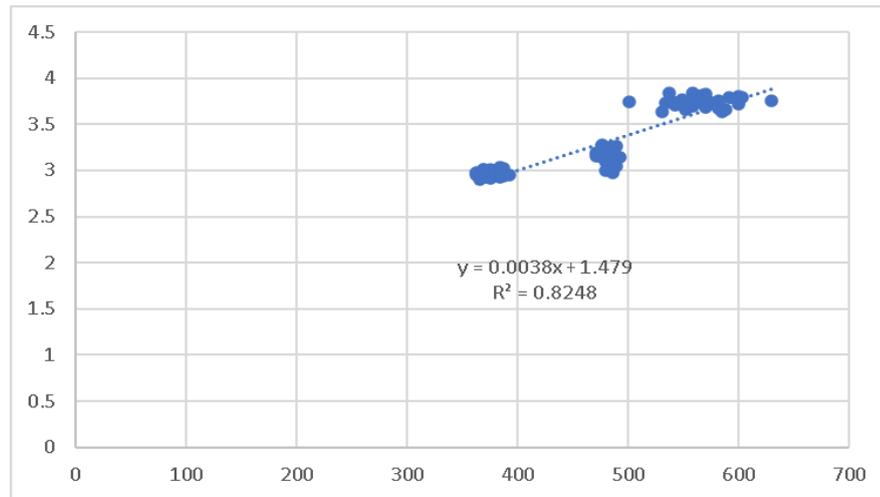
Tabela 4: Calibragem de RPM para m/s.

V1		V1		V3	
RPM	m/s	RPM	m/s	RPM	m/s
384	3	480	3.13	582	3.76
384	3.03	480	3.14	573	3.74
384	3.03	480	3.14	573	3.74
387	3.02	480	3.13	552	3.73
393	2.95	477	3.14	600	3.72
387	2.94	480	3.18	570	3.71
381	2.95	480	3.2	588	3.66
384	2.94	483	3.21	585	3.63
381	2.97	486	3.18	549	3.71
375	3.01	486	3.1	576	3.73
363	2.98	486	3.04	567	3.81
369	2.95	486	2.98	558	3.84
372	2.93	480	3	540	3.74
375	2.92	489	3.05	591	3.79
369	2.93	480	3.1	570	3.83

372	3	483	3.15	561	3.73
372	2.97	486	3.17	603	3.79
372	2.98	477	3.18	600	3.8
378	2.97	471	3.19	537	3.84
384	2.96	480	3.2	543	3.71
381	2.94	489	3.16	570	3.68
384	2.93	480	3.13	567	3.73
378	2.95	483	3.08	582	3.67
378	2.96	486	3.07	534	3.73
369	3.01	492	3.14	630	3.76
375	2.97	483	3.16	561	3.73
369	2.98	483	3.22	552	3.66
366	2.95	486	3.2	558	3.69
366	2.94	471	3.16	531	3.64
363	2.95	483	3.17	555	3.71
363	2.97	483	3.25	558	3.72
369	3.01	477	3.28	501	3.74
375	2.95	477	3.27	549	3.77
375	2.93	489	3.26	555	3.74

Fonte: Autor,2023

Figura 15: Gráfico de calibragem do protótipo de RPM para m/s



Fonte: Autor, 2023

Os dados foram coletados em três velocidades diferentes, denominadas no trabalho como velocidade 1, velocidade 2 e velocidade 3 ( V1, V2, V3 ), geradas a partir da utilização de um ventilador. Esses dados podem ser conferidos na tabela 4. Com esses dados coletados, se fez possível gerar uma equação do primeiro grau no Excel, com os valores em m/s no eixo das ordenadas e os valores em RPM no eixo das abscissas e, utilizando a regra de regressão, foi gerada uma equação que pode ser vista tal qual Figura 15. A ideia por trás do modelo de regressão linear é estimar uma reta que melhor descreva a relação entre variáveis. Pode-se pensar na reta como uma forma de resumir a informação contida na nuvem de pontos, essa é uma reta de regressão linear ( CHEIN, 2019).

#### 6.4 Lógica de programação de arduino utilizada

Para Silveira (2012) a estrutura básica da linguagem de programação arduino é voltada para formação de dois blocos de funções que carregam outros blocos de funções escritas em linguagem C/C++ . O primeiro bloco de função forma a função `setup()`, o segundo a função `loop()`. O `setup()` é a primeira função a ser chamada quando se inicia o programa. Sua execução só ocorre uma vez, dita como funcionará o comportamento dos pinos do arduino e inicializa a porta serial . O `loop()` é a segunda função a ser chamada e todas as funções embarcadas nela são repetidamente executadas, também lê os pinos de entrada do arduino e comanda os pinos de saída e a porta serial .

Nesse projeto foi utilizada a biblioteca 'Servo.h', para controlar um servo motor, onde, primeiramente são coletados os dados do um sensor de velocidade encoder em "pulso por volta", essa informação é incrementada na equação que transforma "pulso por volta" em RPM

e em seguida os valores de RPM são adicionados na equação obtida no processo de calibragem que pode ser observado na Figura 15. Após isso, foram criados parâmetros condicionais para obedecer um intervalo de 1,60 m/s a 2,50 m/s. Esse intervalo é proposto para que o ângulo do regulador seja feito com base nos valores de velocidade, assim mantê-lo na região de valores estabelecida.

### 6.5 Validação do projeto

O desenvolvimento da validação desse projeto teve o intuito de demonstrar a automatização do regulador para manter o fluxo de ar dentro de uma faixa estabelecida previamente. A faixa de velocidade definida para os testes foi de 1,60m/s até 2,50m/s, onde foram submetidas a três intensidades de fluxo diferentes, velocidades 1,2 e 3 (V1, V2, V3), onde a angulação agiria de forma a manter os valores dentro do estabelecido. Os valores obtidos na validação podem ser visualizados na tabela 5, logo abaixo.

O processo de validação necessita ser realizado em um ambiente controlado onde a mudança de ambiente poderia afetar os resultados obtidos. Para tanto, utilizamos uma sala onde o ambiente se mantivesse o mais próximo possível do constante para, assim, mitigar os erros ao máximo. A calibragem também foi realizada nesse mesmo ambiente para que os resultados que gerou a equação que transforma RPM em m/s, estivessem adequados para o processo de validação.

Tabela 5: Dados para a validação do Projeto.

FAIXA DE VELOCIDADE ( $> 1,60$ m/s e $< 2,50$ m/s)					
V1 (m/s)		V2		V3	
1.84	15°	2.22	15°	2.08	15°
1.82	15°	1.96	15°	2.15	15°
1.84	15°	2.06	15°	2.12	15°
1.86	15°	2.08	15°	2.22	15°
1.81	15°	2.11	15°	2.31	30°
1.79	15°	2.08	15°	2.45	30°
1.87	15°	2.06	15°	1.90	30°

1.86	15°	2.08	15°	1.75	30°
1.83	15°	2.08	15°	1.66	30°
1.80	15°	2.12	15°	1.60	30°
1.83	15°	2.11	15°	1.57	0°
1.80	15°	2.12	15°	2.51	30°
1.81	15°	2.08	15°	2.63	30°
1.84	15°	2.08	15°	2.11	15°
1.74	15°	2.13	15°	2.17	15°
1.84	15°	2.14	15°	2.13	15°
1.80	15°	2.08	15°	2.23	15°
1.83	15°	2.13	15°	2.32	30°
1.84	15°	2.12	15°	2.45	30°
1.82	15°	2.13	15°	1.88	30°
1.83	15°	2.16	15°	1.71	30°
1.82	15°	2.40	30°	1.62	30°
1.86	15°	2.43	30°	1.56	0°
1.83	15°	1.93	30°	2.45	30°
1.86	15°	1.76	30°	2.61	30°
1.84	15°	1.58	0°	2.06	15°
1.83	15°	2.21	15°	2.17	15°
1.84	15°	2.25	15°	2.11	15°
1.78	15°	2.04	15°	2.21	15°
1.83	15°	2.03	15°	2.31	30°
1.84	15°	2.01	15°	2.47	30°
1.84	15°	2.03	15°	1.88	30°

1.81	15°	2.03	15°	1.72	30°
1.76	15°	2.05	15°	1.62	30°
1.84	15°	2.06	15°	1.56	0°
1.89	15°	2.04	15°	2.57	30°
1.88	15°	2.04	15°	2.57	30°
1.86	15°	2.08	15°	2.05	30°
1.84	15°	2.08	15°	2.00	30°
1.82	15°	2.08	15°	1.96	30°
1.82	15°	2.04	15°	1.90	30°
1.86	15°	2.06	15°	1.88	30°
1.84	15°	2.05	15°	1.87	30°
1.86	15°	2.04	15°	1.84	30°
1.86	15°	2.11	15°	1.81	30°
1.86	15°	2.05	15°	1.82	30°
1.87	15°	2.11	15°	1.83	30°
1.86	15°	2.06	15°	1.81	30°
1.89	15°	2.06	15°	1.82	30°
1.83	15°	2.05	15°	1.76	30°
1.83	15°	2.08	15°	1.81	30°
1.83	15°	2.04	15°	1.84	30°
1.86	15°	2.07	15°	1.84	30°
1.83	15°	2.07	15°	1.84	30°
1.84	15°	2.09	15°	1.82	30°
1.84	15°	2.03	15°	1.79	30°

Fonte: Autor, 2023

Observando as informações da tabela 5, percebe-se que mesmo com o aumento do fluxo de ar é possível manter os valores dentro de uma faixa estipulada, com o maior controle o desperdício de fluxo de ar em frentes de trabalho é drasticamente mitigado. No caso de falta de fluxo, o equipamento também detecta abrindo o regulador até parâmetros ideais, assim não ocorrendo déficit. Esse controle pode ser observado na tabela 6, que explicita a diferença do fluxo sem automatização e com automatização.

Tabela 6: Média de comparação do fluxo regulado com o aberto (Fonte: Autor, 2023)

	<b>MÉDIA</b>		
	<b>V1 (m/s)</b>	<b>V2(m/s)</b>	<b>V3 (m/s)</b>
<b>ABERTO</b>	2.45	2.59	3.19
<b>REGULADO</b>	1.84	2.08	1.90
<b>% DIMINUIÇÃO</b>	25%	20%	40%

## 7 CONCLUSÃO

Quando os dados de fluxo de ar regulado são postos em comparação com os dados totalmente sem regulação, percebe-se que temos uma diminuição de fluxo em torno de 25% para a velocidade 1, 20% para a 2 e 40% para a 3. De modo geral a diminuição ficou aproximadamente de 29%, podemos observar esses dados na tabela 6. Conclui-se, então, que o protótipo desenvolvido conseguiu regular o fluxo de ar dentro da faixa explicitada.

Esse projeto teve um custo de implantação de R\$184,00, levando em consideração que boa parte dos materiais utilizados foram advindos da reciclagem e a outra parte por materiais com custo de aquisição acessível. No âmbito econômico esse projeto também possui potencial de aplicação a ambientes reais, pois com a adequação desses custos para uma escala real de implantação se torna muito atrativo implantar esse tipo de mecanismo em um sistema de mina subterrânea. Devendo-se considerar que para uma aplicação em uma frente de mina, é necessário implantar mecanismos que torne os equipamentos utilizados robustos e com capacidade de se adequar a ambientes insalubres e que possam gerar defeitos aos componentes eletrônicos dos equipamentos.

Esse modelo também se adequa do ponto de vista de satisfazer os padrões de segurança e saúde estabelecidos pela legislação, pois detecta a falta e os excessos de fluxos de ar em uma frente de trabalho de uma mina subterrânea. Também deve ser levado em consideração sua fácil modificação de mudança de intervalo que se possa estabelecer, assim, facilitando sua implantação para diversos tipos de minérios explorados.

## REFERÊNCIAS

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

AngloGold Ashanti. Relatórios internos de ventilação de mina. 2017.

ALCÂNTARA, Raian. **Uma proposta de utilização da plataforma Arduino em conjunto com o Tinkercad como motivador no aprendizado de algoritmos**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Computação). Instituto Federal da Bahia, Valença, Bahia, 2018.

ARDUINO.CC, 2022. Acesso em 11 de junho de 2022, disponível em <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3>.

AUTODESK Tinkercad, 2022. Acesso em 28 de julho de 2022, disponível em <https://www.tinkercad.com/dashboard?type=circuits&collection=designs>.

BARUSSO, Carolina; PINHEIRO, Gabriel; KNOELLER, Leonardo et al. **Medição de temperatura e umidade utilizando arduino uno e sensor DHT11 para aplicações residenciais**. Revista acadêmica, v.11, p.16, Jul/Dez de 2022.

BEVILACQUA, Nelson. **Materiais de tubulações utilizadas em sistemas de coleta e transporte de esgotos sanitários. Estudo de caso norte de São Paulo**. 2006. 16 p. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo.

BRASIL, Alisson Carvalho Santos. **Aplicação da metodologia DMAIC à gestão de processo de ventilação de mina**. 2020. 125f. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2020.

CARDOSO, Rafael Roletto. **Verificação do sistema de ventilação de uma mina subterrânea dividido em três estágios de mineração para uma mina de carvão baseado na mina de Leão II (RS)**. 2014. 19f. Monografia para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico. Departamento de engenharia minas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2014.

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

CHAVES, Aline, SILVA, Gabriel. **Proposta de uma arquitetura de software e funcionalidades para implementação de um ambiente integrado de desenvolvimento para a linguagem PHP**. In: I Jornada Científica e VI FIPA do CEFET Bambuí, 2008, Centro Federal de Educação Tecnológica de Bambuí-MG, Bambuí, 2008.

CHAVIER, Luís Fernando. **Programação para Arduino-Primeiros Passos. Conceitos iniciais de programação para Arduino**, 2013.

CHEIN, Flávia. **Introdução aos modelos de regressão linear: Um passo inicial para a compreensão da econometria como uma ferramenta de avaliação de políticas públicas**.

Brasília: ENAP, 2019.

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

COSTA, José César de Albuquerque. **Estudos para implantação de um modelo de ventilação sob demanda no Complexo Mineiro de Ipueira-Ferbasa, município de Andorinha-Bahia** . 2017. 95f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2017.

COSTA, Leandro. **Análise via simulação da ventilação em mina subterrânea - Estudo de caso da mina córrego do sítio I**. 2019. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, 2019.

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

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

CUNHA, Daniel. **Concepções prévias de estudantes da educação básica sobre o conceito de ar- Uma investigação no âmbito do projeto UnB-TUR científico**. 2017. 37f. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Química). Universidade de Brasília, Instituto de Química, Brasília, 2017.

CURI, Adilson. **Minas de Lavra**. São Paulo: Oficina de texto, 2017.

(DNPM), Departamento Nacional de Produção Mineral. **Portaria nº 237 de 18 de outubro de 2001- Normas Reguladoras de Mineração (NRM's)**. Brasília, 2001. Disponível em: [https://www.dnpm-pe.gov.br/Legisla/Port\\_237\\_01.htm](https://www.dnpm-pe.gov.br/Legisla/Port_237_01.htm) . Acesso em: 15 mar. 2022.

Division of mine;“**First Class Mine Foreman Certification Study Guide**”, Virginia Department of Mines, Minerals and Energy. 2004.

FILHO, Arildo de Oliveira da Silva. **Tecnologias e práticas que diminuem o custo e aumentam a confiabilidade do sistema de ventilação ouro**. 2021. 41f. Monografia para graduação em Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2021.

FRADE, João; SEVERO, Francisco. Climatização geral. **Instituto Superior de Engenharia de Lisboa-Área Departamental de Engenharia Mecânica**, 2006.

GANCEV, Boris Ferreira. Avaliação de condições de qualidade do ar em mina subterrânea. **TecMec 2006**, 2006.

**GEDEL PLÁSTICO**. Gedel Plástico. Disponível em: < <https://gedelplasticos.com.br/artigos/acrilonitrila-butadieno-estireno/>> . Acesso em 22 maio de 2023.

GONÇALVES, Hugo. **A internet das coisas na mineração**. 2018. Trabalho de Conclusão de

Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2018.

GOULART, Leonardo Augusto Resende. **Monitoramento remoto de poços tubulares profundos na mineração**. 2015. 83f. Dissertação TCC (Graduação em Engenharia de Automação Industrial), Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, MG, 2015.

HARTMAN, H. L. **Mine ventilation and air conditioning**. John Wiley & Sons, Inc. Segunda edição. ISBN: 0-471-05690-1, 1982.

NASCIMENTO, Antonio; GOEBEL, Bruno. **Desenvolvimento de um claviculário eletrônico**. 2018. 55f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, PR.

MAZZAROPPI, Marcelo, **Sensores de Movimento e Presença**. Projeto de graduação, UFRJ-DEE, 2007.

Machado, H. G. **Gestão de Riscos em Minas Subterrâneas - avaliação de minas subterrâneas profundas**. Dissertação de Mestrado. NUGEO. UFOP. 2011.

McRoberts, Michael **Arduino básico**. São Paulo : Novatec Editora, 2011.

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

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. Portaria 2.037 de dez. 1999. Normas regulamentadoras de segurança e saúde no trabalho (NR-22): segurança e saúde ocupacional na mineração (122.000-4). Brasília, 1999.

MINOVA, 2022, Acesso em 01 de Agosto de 2022, disponível em: [https://www.minovaglobal.com/media/2543/steel-vcd-brochure\\_final\\_130819\\_digital.pdf](https://www.minovaglobal.com/media/2543/steel-vcd-brochure_final_130819_digital.pdf).

OLIVEIRA, André. **Prototipagem de anemômetro em plataforma arduino**; COBENGE (Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia) , L, 2022.

OLIVEIRA, Marcelo Eduardo de et al. **Introdução à robótica educacional com Arduino – hands on!: iniciante**. . Pirassununga: Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da USP. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/9786587023052>. Acesso em: 25 jul. 2022. , 2020

OLIVEIRA, Leonardo Toletto de. **Análise de risco de pilares de mina subterrânea via programação não linear**. 2019. 27f. Monografia para graduação em Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2019.

PINTO, Caio Cezar Alves. **Inundação controlada como alternativa de fechamento de mina subterrânea**. 2021. 62f. Monografia para graduação em Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2021.

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

costs/, 2015.

RODRIGUES, Hermeson Carneiro. **Simulação da ventilação em mina subterrânea**. 2014. 27f. Trabalho de conclusão de curso (TCC) para engenharia de minas e meio ambiente (FEMMA), Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA), Marabá, PA, 2014.

SANTOS, Rita; SILVA, José; OLIVEIRA, Michel; MAZZINGHY, Douglas. **Simulação e maquetes em práticas pedagógicas como método de aprendizagem: Lavra subterrânea**. 14f. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas (PPGEM), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), MG.

SOUZA, Darlan. **Uso de Arduino e módulo GPS para monitoramento por telemetria de rotas de transporte por caminhões em minas a céu aberto**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas). Universidade Federal do Ceará Campus de Crateús, Crateús, Ceará, 2021.

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.

SEBESTA, Robert W. **Conceito de linguagem de programação**. 4.ed. Rio de Janeiro: Alta Books, 2000.

SEVERO, J.A.A. **Sistema microcontrolado para funcionamento alternado e automático de motobombas de recalque**. 2012. 84f. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Computação)- UniCEUB- Centro Universitário de Brasília, Brasília-DF, 2012.

SILVEIRA, João. **Arduino cartilha para programação em C**. Revista do Arduino, [www.revistadoarduino.com.br](http://www.revistadoarduino.com.br) , Edição 1.0, p.2, 2012.

TOMASCHITZ, Flávio. **Controle e análise da velocidade de servos-motores de manipuladores cartesianos em uma linha automatizada de estamparia**. 2013. 11 p. Monografia de conclusão de curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba , PR.

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

TURRA, Renan,S. **Inspeção automatizada na aplicação de canudos em embalagens cartonadas**, 2018. 106f. Trabalho de Conclusão de Curso ( Bacharelado em Engenharia Elétrica), Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande Do Sul - UNIJUI, Ijuí-RS, 2018.

VALE, Júlia. **Estratégias de Controle no Processamento de Minério de Ferro**. 2014. Monografia, Pós Graduação em Engenharia de Recursos Minerais, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

**VIDA DE SILÍCIO**, 2022 , Acesso em 25 de julho de 2022, disponível em <https://www.vidadesilicio.com.br/> .

VUTUKURI, V. S.; LAMA, R. D. **Environmental engineering in mines**. Cambridge

University Press, 1986.

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.