

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas  
Mestrado Profissional

Dissertação de Mestrado

Aplicação da metodologia DMAIC à gestão de processo de ventilação de mina

Autor:

Alisson Carvalho Santos Brasil

Orientador: Dr. Renan Collantes Candia

Dezembro de 2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas  
Mestrado Profissional

Alisson Carvalho Santos Brasil

Aplicação da metodologia DMAIC à gestão de processo de ventilação de mina

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas – Mestrado Profissional, da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Área de concentração: Tecnologia Mineral e Meio Ambiente

Orientador: Dr. Renan Collantes Candia

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG  
2020

B823a Brasil, Alisson Carvalho Santos.  
Aplicação da metodologia DMAIC à gestão de processo de ventilação de mina [recurso eletrônico] / Alisson Carvalho Santos Brasil. - 2020.  
1 recurso online (xvi, 202 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Renan Collantes Candia.

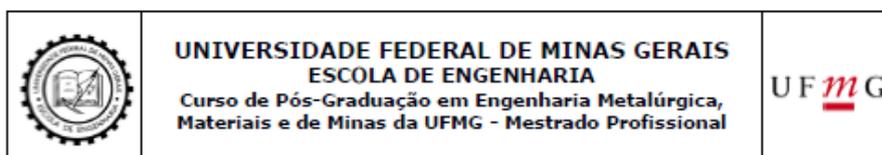
Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos e apêndices: f. 128-197.

Bibliografia: f. 198-202.  
Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia de minas - Teses. 2. Tecnologia mineral - Teses.  
3. Gestão de processos - Teses. 4. Minas - Ventilação - Teses. I. Candia, Renán Collantes. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 622(043)



**APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DMAIC À GESTÃO DE PROCESSO  
DE VENTILAÇÃO DE MINA**

**ALISSON CARVALHO SANTOS BRASIL**

Dissertação submetida à Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG – Mestrado Profissional da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

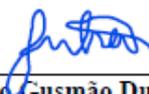
Aprovada em 10 de dezembro de 2020.

Por:



---

Prof. Renan Collantes Candia, Dr. (UFMG)  
Orientador



---

Prof. Jose Ildefonso Gusmão Dutra, Dr. (UFMG)



---

Prof. Michel Melo Oliveira, Dr. (UFMG)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos amigos, familiares em especial Ana Maria, e a minha namorada Thaís pela paciência e o apoio desse trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Renan Collantes Candia, pelo incentivo, empenho e dedicação, meu muito obrigado, e aos Profs. participantes da banca.

Á Mosaic Fertilizantes unidade operacional Taquari Vassouras, pela disponibilização das informações e dados técnicos disponibilizados.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	viii
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xii
<b>LISTA DE APÊNDICES</b> .....	xiii
<b>RESUMO</b> .....	xv
<b>ABSTRACT</b> .....	xv
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	17
1.1. Objetivo principal .....	18
1.2. Metodologia .....	19
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	21
2.1 Ventilação de mina .....	21
2.1.1 Conceitos gerais .....	21
2.1.2 Características do ar subterrâneo .....	24
2.1.3 Contaminantes no ambiente subterrâneo .....	25
2.1.4 Circuitos básicos de ventilação .....	27
2.1.5 Controle e medição de perdas de ar .....	33
2.1.6 Fundamentos físicos da ventilação.....	37
2.1.7 Vazão de ar.....	40
2.1.8 Norma regulamentadora brasileira para ambiente subterrâneo .....	41
2.1.9 Conforto térmico subterrâneo .....	46
2.1.10 Simulação de circuito de ventilação .....	48
2.2 Melhoria Contínua .....	49
2.2.1 Histórico .....	49
2.2.2 Metodologia DMAIC .....	53
2.2.3 Definição .....	53
2.2.4 Medição .....	55

2.2.5 Análise .....	57
2.2.6 Improve/ação .....	59
2.2.7 Controle .....	61
2.2.8. Escolha do projeto <i>Lean Seis Sigma (LSS)</i> .....	63
2.2.9. Aplicação da melhoria contínua em indústrias de mineração .....	65
<b>3. ESTUDO DE CASO</b> .....	<b>68</b>
3.1 Localização e geologia.....	68
3.2 Operação de mina .....	69
3.3 Circuito de refrigeração e ventilação de mina .....	70
3.4 Planejamento de produção e produto beneficiado .....	72
3.5 Identificação do problema .....	74
3.6 Redução do número de horas paradas por temperatura em painel de lavra.....	82
3.6.1 Identificação do problema .....	82
3.6.2 Definição e medição do problema .....	84
3.7 Análise de perdas do circuito de ventilação.....	93
3.8 Análise de perdas de ar .....	96
3.9 Análise do sistema de refrigeração .....	103
3.10 Uso de tapumes: correias x lona .....	106
3.11 Equipamentos em rampa principal .....	109
3.12 Plano De Ação .....	111
3.13 Redistribuição da vazão de ar .....	112
3.14 Redução das perdas de ar.....	115
3.15 Desobstrução de galerias de retorno .....	118
3.16 Teste de climatização.....	119
<b>4. RETORNO FINANCEIRO</b> .....	<b>124</b>
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	<b>125</b>
<b>ANEXO I</b> .....	<b>189</b>
<b>ANEXO II</b> .....	<b>190</b>

<b>ANEXO III</b> .....	191
<b>ANEXO IV</b> .....	192
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	198

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1.1- Fluxograma para a metodologia.....	19
Figura 2.1- Diagrama do triangulo de Coward .....	27
Figura 2.2- Desenho esquemático da ventilação natural .....	29
Figura 2.3- Esquema de ventilação mecanizada .....	30
Figura 2.4- Sistema de ventilação secundária/auxiliar .....	31
Figura 2.5- Ventilação principal e secundária .....	32
Figura 2.6- Ventilação principal e secundária para câmeras e pilares.....	33
Figura 2.7- (a) Modelo de regulador, (b) Modelo de portas, (c) Modelo de regulador, (d) modelo de cruzamento de ar .....	34
Figura 2.8- Cadastro de velocidade de ar na mina.....	36
Figura 2.9- Resultado do ponto de vazão em dado ponto da mina.....	36
Figura 2.10- Pontos adotados para medição de temperatura na mina em estudo .....	44
Figura 2.11-(a) modelo para determinação do índice IBUTG (NHT 01 C/E, 1985), (b) aparelho TGD 200 utilizado na mina em estudo .....	44
Figura 2.12- Fluxograma para medição de temperatura .....	46
Figura 2.13-Rendimento do trabalhador x temperatura .....	46
Figura 2.14- Desperdícios no <i>Lean Manufacturing</i> .....	52
Figura 2.15- Definição método DMAIC.....	53
Figura 2.16- Fluxo de definição da metodologia DMAIC.....	54
Figura 2.17- Avaliação dos valores de Cp e CpK no processo geral.....	57
Figura 2.18- Fluxo de medição da metodologia DMAIC.....	57
Figura 2.19- Fluxo de análise da metodologia DMAIC .....	59
Figura 2.20- Fluxo de ação/melhoria referente a metodologia DMAIC.....	61
Figura 2.21- Modelo de carta de controle para valores individuais.....	62
Figura 2.22- Fluxo de controle referente a metodologia DMAIC .....	62
Figura 2.23- Fluxo para seleção de projetos Lean Seis Sigma-LSS.....	64

Figura 3.1- Mapa de localização e acesso da mina.....	68
Figura 3.2- Composição litológica dos horizontes de correlação.....	68
Figura 3.3- Lavra com minerador contínuo.....	69
Figura 3.4-Casa de refrigeração da mina subterrânea.....	71
Figura 3.5- Desenho do circuito de ventilação principal da mina.....	72
Figura 3.6- Modelo de ventilação secundária adotado na mina.....	73
Figura 3.7- Produção durante o período de 2015 a 2019.....	74
Figura 3.8- Perdas acumuladas por indicador em 2019.....	76
Figura 3.9- Correlação de indicadores de performance.....	77
Figura 3.10- Diagrama de Pareto de perdas em horas total e não planejada.....	79
Figura 3.11- Matriz de esforço e impacto para os problemas prioritários.....	81
Figura 3.12- Memória de cálculo financeiro de perda.....	82
Figura 3.13- Tempo de parada de painel de lavra em horas.....	83
Figura 3.14- Layout de disposição de painel.....	83
Figura 3.15- <i>Project Charter</i> para redução do número de horas paradas por temperatura em painel de lavra.....	85
Figura 3.16- Estudo de capacidade do processo do painel 1.....	87
Figura 3.17- Estudo de capacidade do processo do painel 2.....	87
Figura 3.18- Análise estatística do painel de lavra 1.....	90
Figura 3.19- Análise estatística do painel de lavra 2.....	91
Figura 3.20- Diagrama de Ishikawa para possíveis causas do problema.....	93
Figura 3.21- Quadrante de priorização para as iniciativas.....	93
Figura 3.22- Diagrama de Pareto de perdas em horas por alta temperatura.....	94
Figura 3.23- Vazão de ar atual para os painéis de lavra 1 e 2.....	98
Figura 3.24- Perdas de ar ao longo dos painéis 1 e 2.....	99
Figura 3.25- Perdas de ar (%) nos painéis de lavra.....	99
Figura 3.26- Simulação de vazão de ar atual para os painéis de lavra 1 e 2 com uso de reguladores/portas.....	100
Figura 3.27- Simulação do circuito de ventilação, com uso de reguladores/portas.....	101

Figura 3.28- (a) vazão atual ( $m^3/s$ ) para os painéis 1 e 2, (b) vazão simulada para os painéis 1 e 2.....	102
Figura 3.29- Temperaturas médias do sistema de refrigeração e ventilação da mina. .	104
Figura 3.30- Correlação entre a temperatura de refrigeração x temperatura do painel 1. ....	105
Figura 3.31- Correlação entre a temperatura de refrigeração x temperatura do painel 2.....	105
Figura 3.32- Tendência de temperatura relacionado ao sistema de refrigeração.....	106
Figura 3.33- (a) tapume de correia com <i>poliurethano</i> , (b) tapume de lona sem vedação ..	107
Figura 3.34- Problemas operacionais do tapume de lonas em mina subterrânea .....	107
Figura 3.35- Análise estatísticas das perdas de ar com tapume de correia e tapume de lona .....	108
Figura 3.36- Perdas de ar entre tapume de correias x lona .....	109
Figura 3.37- Modelo esquemático de obstrução da rampa de acesso, em virtude de equipamentos .....	110
Figura 3.38- Análise da velocidade e vazão de ar no ponto A2 .....	111
Figura 3.39- (a) sem regulador de ar; (b) aplicação de regulador e portas para redistribuição de ar.....	113
Figura 3.40- Carta de controle para vazão de ar referente aos painéis 1 e 2, após a instalação de portas e reguladores .....	113
Figura 3.41- Carta de controle para temperatura de ar referente aos painéis 1 e 2, após a instalação de portas e reguladores .....	114
Figura 3.42- Comparativo das vazões médias de 2019, 2020 e simulada, referente aos painéis 1 e 2, após a instalação de portas e reguladores .....	114
Figura 3.43- Comparativo das temperaturas médias de 2019, 2020 e simulada, referente aos painéis 1 e 2, após a instalação de portas e reguladores .....	115
Figura 3.44- Perdas de ar da mina em um dos acessos de lavra .....	116
Figura 3.45- (a) perdas de ar entre portas; (b) aplicação de vedação em portas de acessos para redução de fugas de ar.....	116

Figura 3.46-(a) cortinas sem vedação nas laterais da galeria; (b) cortinas com vedação nas bordas da galeria .....	117
Figura 3.47- (a) perdas de ar no trecho antes das melhorias; (b) perdas de ar no trecho após as melhorias. ....	117
Figura 3.48- (a) e (b) galeria de retorno obstruída; (c) desobstrução da galeria de retorno. ....	118
Figura 3.49- Estatística da temperatura antes do teste do climatizador.....	119
Figura 3.50- Protótipo de climatizador móvel.....	120
Figura 3.51- Instalação do climatizador acoplado ao ventilador secundário.....	120
Figura 3.52- Estatística da temperatura após do teste do climatizador.....	121
Figura 3.53- (a) rendimento do trabalhador antes do climatizador; (b) rendimento do trabalhador após uso do climatizador.....	122
Figura 3.54- Questionário sobre sensação térmica na mina, antes dos testes com climatizador.....	122
Figura 3.55- Questionário sobre sensação térmica na mina, durante testes com climatizador.....	123
Figura 3.56- Comparativo do número de horas paradas de painéis de lavra, por temperatura durante o trimestre de 2019 e 2020.....	124
Figura 3.57- Cálculo financeiro de retorno com redução do número de horas paradas por temperatura em painéis de lavra.....	125

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Composição média percentual do ar seco.....	25
Tabela 2.2- Limites máximos permissíveis para gases.....	26
Tabela 2.3- Velocidade de ar recomendado.....	35
Tabela 2.4-Regime de trabalho intermitente de acordo com o IBUTG °C.....	45
Tabela 2.5- Principais índices da capacidade/capabilidade do processo .....	56
Tabela 2.6- Exemplos de melhoria contínua aplicada à mineração.....	67
Tabela 3.1- Frota de equipamentos da mina .....	70
Tabela 3.2- Características do sistema de ventilação principal .....	72
Tabela 3.3- Indicadores de performance em 2019.....	75
Tabela 3.4- Paradas planejadas e não planejadas relacionadas ao fator da utilização....	78
Tabela 3.5- Matriz de priorização de problemas .....	80
Tabela 3.6- Matriz de esforço e impacto .....	80
Tabela 3.7- Distância dos painéis ao principal centro de ventilação da mina .....	84
Tabela 3.8- Temperatura média e vazão nos painéis 1 e 2 .....	86
Tabela 3.9- Matriz de priorização.....	92
Tabela 3.10- Análise do modo de falha e efeito .....	95
Tabela 3.11- Dados para calibração do modelo do circuito de ventilação .....	96
Tabela 3.12- Simulação da vazão mínima e ar para painel de lavra 1 e 2.....	98
Tabela 3.13-Vazão simulada x vazão necessária por área.....	100
Tabela 3.14- Simulação de vazão antes do regulador e depois do regulador .....	102
Tabela 3.15- Plano de ações para redução de horas paradas por ventilação .....	111
Tabela 3.16- Plano de ações para redução de horas paradas por ventilação .....	118
Tabela 3.17- Estatística das temperaturas após o teste dos climatizador.....	120

**APÊNDICES**

**APÊNDICE I** ..... 129

**APÊNDICE II** ..... 143

**APÊNDICE II** ..... 159

**APÊNDICE IV** ..... 175

## RESUMO

A mineração brasileira vem desempenhando historicamente papel de importância nos ciclos econômicos, com correlação direta na participação do produto interno bruto (PIB) brasileiro ao longo dos séculos. A melhoria contínua é essencial em todos os ciclos econômicos, e se faz ainda mais importante em cenários de recessões e preços recuados de *comodities*, sendo vital a melhoria dos processos, buscando menores custos e tornar conceitos de gestão e excelência operacional como parte integrante da empresa. Esta mudança de filosofia se tornou essencial para a sobrevivência, e deve-se ao fato da complexidade das operações, que transmitem o conceito de minimização de desperdícios. A proposta de dissertação tem como premissa apresentar soluções baseadas em melhoria contínua atrelado ao baixo esforço e alto impacto nas ações, buscando-se um baixo investimento nas ações. Foram pesquisadas oportunidades de aplicação de melhoria contínua a ventilação de mina, baseando-se em soluções práticas, sendo a metodologia aplicada conhecida como (DMAIC)- Definição-Medição-Análise-Ação-Controle, buscando-se resultados com menor desperdício, aumento da produção e redução de custos operacionais. O foco ao estudo será o setor de ventilação de mina, na qual serão analisados perdas e desperdícios que geram e/ou potencializam aumento de temperatura em painéis de operação de lavra, e como resultando interrupções na operação de lavra da mina e desconforto térmico para os operadores. Pretende-se com a inclusão de melhorias, à redução do impacto de horas paradas por temperatura em painéis de lavra e incremento de produção na mina (t).

**Palavras-chave:** Ventilação de Mina. Metodologia DMAIC. Gestão de Processos. Melhoria Contínua.

## ABSTRACT

Brazilian mining has historically played an important role in economic cycles, with a direct correlation in the participation of the Brazilian gross domestic product (GDP) over the centuries. However, in recessions and with reduced price scenarios, it is essential to improve processes, to seek lower costs involved, making management concepts, operational excellence an integral part of the corporate organizational culture. This change in philosophy has become essential for survival and is due to the fact of the complexity of the operations, which convey the concept of zero waste. The dissertation has as premise and objective to present solutions based on continuous improvement, low effort, high impact on actions, low investment. All opportunities will be carried out in an underground mine linked to the infrastructure sector and specifically mine ventilation. Opportunities for the application of continuous improvement of mine ventilation were researched, based on good practices and market research, based on the DMAIC methodology (Definition-Measurement-Analysis-Action-Control), seeking results with less waste, increased production and reduced operating costs. Focus will be given to the mine ventilation sector, where qualitative and quantitative losses will be analyzed that generate temperature increases in specific mining panels, resulting in interruptions in the mine operation and thermal discomfort for operators on the fronts. In addition to procedural improvements, it will seek simulations with the use of software that allow greater air optimization ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) for the mining fronts. The intention is to include these improvements, to reduce the impact of hours stopped by temperature in mining panels and to increase production in the mine.

**Keywords:** Mine ventilation. DMAIC methodology. Process Management. Continuous improvement.

## 1. INTRODUÇÃO

Os trabalhos em minas subterrâneas apresentam fundamentalmente três grandes aspectos para sua continuidade podendo ser resumidos: segurança da estabilidade do maciço rochoso (princípios técnicos que visem a estabilidade das escavações de modo seguro e economicamente viável); segurança e conforto ambiental (manter a temperatura dentro dos limites admissíveis pelas normas regulamentadoras) e o terceiro aspecto a ser considerado são os custos (saúde financeira empresarial).

As atuais minas subterrâneas otimizadas contam hoje com complexas escavações, a fim de manter condições de segurança, produtividade e custos dentro dos seus orçamentos. Em uma subdivisão clássica de mina subterrânea temos as seguintes áreas: geologia, planejamento de lavra, operação de lavra, perfuração e desmonte e apoio/infraestrutura, sendo a infraestrutura comumente subdividida por áreas/serviços que auxiliam e dão condições técnicas e operacionais à lavra, podendo ser divididas comumente em: ventilação, Geomecânica, perfuração e desmonte de rocha.

A mineração subterrânea é considerada um processo industrial, já que envolve procedimentos e ferramentas contínuas, na qual devem ser seguidas para reduzir a variabilidade dos processos com menores falhas. Entretanto rever processos hoje é parte fundamental das empresas no intuito de buscar a permanência em mercado cada vez mais competitivo.

A ventilação de mina subterrânea tem papel ligado e direto a questões de segurança, saúde e performance avaliada pelo rendimento do trabalhador. Condições ambientais subterrâneas causam efeitos no rendimento operacional, e desta forma o sistema de ventilação implantado deve atender às normas exigidas (NR-22/17/15) principalmente aos requisitos de temperatura. Segundo Hartmann (1982) os objetivos de um sistema de ventilação estão atrelados ao fornecimento de ar para os trabalhadores na quantidade e qualidade necessárias, diluindo e tornando inofensivos gases tóxicos e explosivos ocorridos no ambiente subterrâneo, fazendo a remoção de poeiras e gases a uma velocidade suficiente, bem como o controle da umidade.

A necessidade do controle da quantidade e qualidade do ar aumenta de acordo

com o aprofundamento, a expansão e a complexidade da mina subterrânea. Segundo Costa (2017) o controle do circuito de ventilação depende do conhecimento: das funções a serem realizadas, dos princípios que regem o comportamento dos gases e dos métodos de planejamento dos projetos de ventilação que obtenham o efeito desejado.

Assim como em todo o processo, na mineração, a área da ventilação de mina apresenta oportunidades de melhoria. Os desperdícios nesta área são grandes e por muitos imperceptíveis; a menos que aconteçam paradas por exemplo por elevação de temperatura. Dentre os fatores que contribuem ao aumento de temperatura, podem ser consideradas: as fugas de ar geralmente em (cortinas, tapumes, portas, dutos rasgados), baixa capacidade dos ventiladores instalados, excesso de área aberta/lavrada, distância das frente de lavra ao circuito de ventilação principal, dificuldade técnica de regulagem dos ventiladores, instalação de ventiladores fora ao projeto aumentando o curto circuito e cruzamento de fluxo de ar.

Avaliando-se que perdas e desperdícios devem ser eliminados e/ou minimizados, e que nenhum processo é permanentemente adequado ou correto indefinidamente, foi aplicado um estudo baseado na metodologia *Lean Seis Sigma*, ao processo de ventilação de mina atendendo aos requisitos de: baixo esforço, alto impacto e custo de implementação baixo, com uso da metodologia DMAIC.

A mineração por inteiro pode se valer de metodologias ágeis em melhoria contínua, no qual se busca a solução de causas ainda não resolvidas, melhorando processos, e potencializando soluções a baixo custo e investimento. A visão do *Lean Seis Sigma* aplicada ao processo de ventilação de mina tem como visão a redução de desperdícios e processamentos impróprios, melhorias do processo, e aumento do envolvimento das pessoas na melhoria dos processos focados na gestão.

### 1.1 Objetivo Principal

O estudo terá como objetivo realizar melhorias operacionais baseadas na metodologia DMAIC em ventilação de mina, visando ao aumento das horas disponíveis para a operação de lavra.

## 1.2 Metodologia

O principal ponto para a escolha de um trabalho de melhoria contínua, consiste na escolha de situações que merecem tratativas e que até então, são desconhecidas e/ou pouco elucidadas no âmbito operacional. Para uma boa assertividade do programa de melhoria a definição dos projetos de estudo é uma das atividades mais importantes do processo de implementação. Projetos bem selecionados conduzirão a resultados rápidos e significativos e, conseqüentemente contribuirão para o sucesso e a consolidação da missão, visão e valores da empresa. Por outro lado, projetos inadequados implicará ausência ou atraso de resultados e frustração de todos os envolvidos, o que poderá determinar o fracasso do programa na organização, saber o fluxograma do processo de seleção é vital para a continuidade e maturidade dos projetos.

Para analisar problemas que merecem ser priorizados, foi criado um fluxograma visualizado pela Figura 1, no qual é demonstrado a importância da avaliação inicial de indicadores de performance da empresa e gargalos operacionais, a fim de traçar projetos onde se busquem soluções para melhorias do processo de operação de mina.

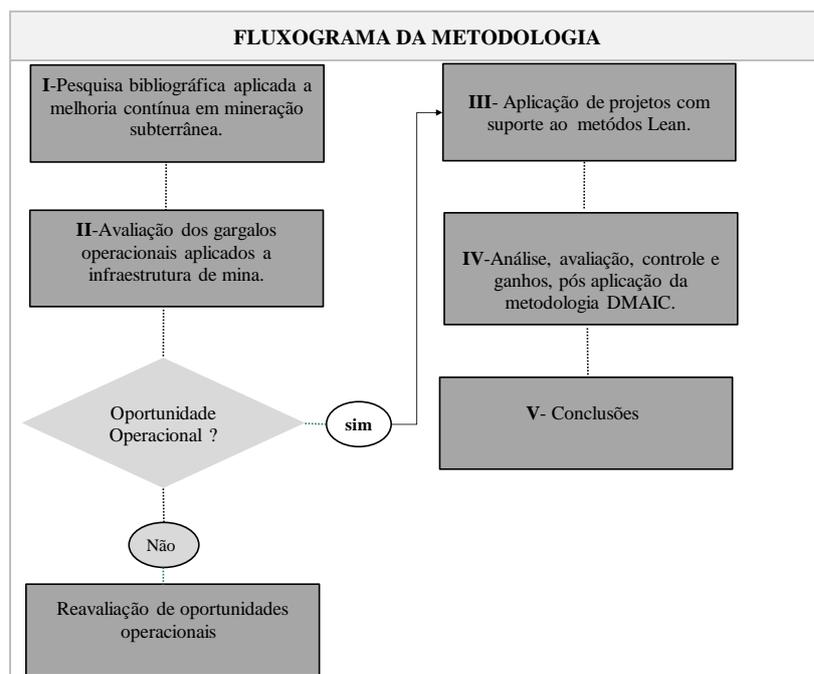


Figura 1.1- Fluxograma para metodologia. (Contribuição do autor, 2020).

Para à questão da redistribuição do fluxo de ar na mina, foram realizadas coletas de vazão de ar ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) e temperatura globo IBUTG ( $^{\circ}\text{C}$ ) em locais estratégicos de entroncamento em um dos acessos principais do circuito de ventilação, captando as medições no período 28/01/20 à 20/03/20 para inserção dos dados reais e atuais, garantindo desta forma maior assertividade em relação aos dados atuais do circuito de ventilação da mina. Os outros dados coletados para os diferentes processos de melhoria, foram realizados de acordo com os dados existentes ou coletas específicas de campo durante os meses do projeto. Após a compilação de dados e informações, estas serão analisados de forma quantitativa/estatística e/ou qualitativa, a fim de buscar parâmetros que possam ajudar a tomada de decisões para a melhoria do processo de ventilação como todo.

A modelagem para a simulação em software necessitou de alguns parâmetros e características determinados e/ou assumidos. Os parâmetros indicados foram calculados ou medidos seguindo a metodologia discutida na referência bibliográfica. Os dados exigidos são:

- ✓ TBS: Temperatura de bulbo seco na entrada ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- ✓ TBN: Temperatura de bulbo úmido na entrada ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- ✓ TG: Temperatura de globo ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- ✓ Pressão na entrada (kPa).
- ✓ Fluxo de ar ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) e velocidade (m/s).
- ✓ Comprimento do trecho ou interseção mapeada (m).
- ✓ Profundidade do painel e/ou acesso (m).
- ✓ Área da seção transversal ( $\text{m}^2$ ).
- ✓ Fator de fricção ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).
- ✓ Fator de umidade.
- ✓ TRV- temperatura da rocha virgem ( $^{\circ}\text{C}$ ).

A velocidade do ar foi medida por um anemômetro devidamente calibrado, e o mesmo para o psicrômetro, para obtenção de temperatura globo (bulbo seco e bulbo úmido) nas medições coletadas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Ventilação De Mina

#### 2.1.1 Conceitos Gerais

A ventilação em minas subterrâneas tem como finalidade assegurar o fornecimento de ar dentro dos parâmetros admissíveis pelas normas e legislação vigentes, criando condições de trabalho e prevenção contra explosões, decorrentes da acumulação de gases/ou poeira explosiva. Uma mina subterrânea apresenta mudanças constantes; como exemplo, em frentes de lavra e sondagem, e nenhum sistema de ventilação permanece adequado indefinidamente, sendo necessário requerer monitoramento e ajustes para contínuo fornecimento de ventilação adequada.

A necessidade vital de insuflar ar nas minas subterrâneas teve seu histórico entre 4.000 e 1.200 a.C, em minerações de gipsita no sul da Inglaterra, os mineradores faziam fogueiras nas faces das escavações com a finalidade de quebrar a resistência mecânica da rocha e fragmentá-la. Estes mineiros do Neolítico provavelmente não observaram que a técnica de promover fogueiras no subsolo promovia um fluxo de ar nas galerias. Esta técnica de criar um fluxo de ar em subsolo através de fogueiras é descrita pelos gregos e romanos e foi redescoberta na Europa medieval, sendo posteriormente muito utilizada durante a revolução industrial na Inglaterra (Mcpherson, 2000).

Com o desenvolvimento de galerias cada vez mais profundas dentro dos corpos de minério, fazia-se necessário suprir os trabalhadores com oxigênio. A técnica utilizada para estabelecer um fluxo de ar no interior da mina era fazer uma fogueira no poço de saída de ar. Isto causa um aquecimento do ar no interior da mina, que sobe pelo poço de saída, gerando um fluxo de ar. Em algumas minas de prata na Grécia (600 a.C.), os mineiros já dispunham de sistemas de ventilação onde estavam previstas galerias de entrada e saída de ar, bem como galerias para condução de ar fresco e galerias de retorno de ar (Mcpherson, 2000).

O primeiro grande livro de mineração foi escrito por Georgius Agrícola, de

*Re Metallica*, em 1556. Este livro trouxe algumas técnicas de mineração utilizadas, e foram demonstrados métodos de ventilação utilizados até então, tais como: defletores de superfície, ventiladores centrífugos de madeira impulsionados por homens ou cavalos, divisores de fluxo em subsolo, etc, o que nos faz verificar que o princípio técnico de ventilação do passado continua muito presente, sendo sua modificação mais sentida pelo avanço tecnológico, mecanização dos equipamentos e aumento da profundidade das minas atuais.

A revolução industrial iniciada na Inglaterra promoveu grandes evoluções nos sistemas de ventilação. Com a grande demanda de carvão para a alimentação das máquinas a vapor, os sistemas de ventilação até então empregados ficaram inadequados. Com o aprofundamento das minas e uma ventilação precária, passaram a ocorrer acidentes decorrentes das grandes concentrações de metano. John Buddle (1773-1843) um engenheiro do sul da Inglaterra, preocupado em solucionar este problema introduziu o sistema de ventilação em paralelo, dividindo os setores de lavra em painéis, separando os fluxos de ar por meio de tapumes, diminuindo as concentrações de metano (Mcperson, 2000).

Com a crescente necessidade de um maior fluxo de ar no interior das minas, desenvolveram-se as técnicas de ventilação mecânica através de ventiladores instalados no poço de entrada de ar (insuflação), ou na saída da ventilação (exaustão). Esse desenvolvimento deu-se principalmente a partir da segunda metade do século XIX, onde começou o desenvolvimento de ventiladores mecânicos de grandes diâmetros, exclusivamente centrífugos, e de velocidades reduzidas movidos por moinhos de vento ou roda hidráulica (Anon, 2000).

Em seguida, ventiladores de mão pequenos foram usados para conduzir o gás das frentes de lavra para as correntes de ar principais. Portas foram colocadas estrategicamente como parte do sistema de ventilação para guiar o fluxo do ar para as áreas selecionadas. Com a crescente necessidade de um maior fluxo de ar no interior das minas, foram desenvolvidas técnicas de ventilação mecânica com ventiladores instalados na entrada de ar (insuflação), ou na saída da ventilação (exaustão). Esse desenvolvimento ocorreu, principalmente, a partir da segunda metade do século XIX, com os ventiladores mecânicos de grandes diâmetros, exclusivamente centrífugos e de velocidades reduzidas (Pinto, 2013).

De um modo geral o principal objetivo da ventilação em uma mina subterrânea é adequar e controlar a qualidade e a quantidade de ar que lá circulam nas escavações (Hartman,1982). A deficiência desse sistema pode causar danos irreversíveis à saúde dos trabalhadores e comprometer o funcionamento da mina. Hoje a ventilação soluciona também o problema de gases nocivos, que em geral, são produzidos pelos próprios equipamentos utilizados na mineração.

O principal fundamento do estudo da ventilação é o fornecimento de ar fresco ao ambiente subterrâneo para atendimento aos requisitos da respiração humana, e manter as condições termo ambientais adequadas aos trabalhadores que laboram, de modo eficaz, seguro e com baixos custos, e há o princípio fundamental da expulsão de gases tóxicos e nocivos da mina através do sistema de exaustão dos gases. Hartmann (1982) explica que os objetivos de um sistema de ventilação são:

- ✓ Fornecer ar para os trabalhadores na quantidade e qualidade necessárias.
- ✓ Fornecer a quantidade de ar necessária para diluir e tornar inofensivos gases tóxicos e explosivos.
- ✓ Eliminação de concentrações de poeiras em suspensão do ambiente de trabalho.
- ✓ Fornecer ar com velocidade suficiente para remover da mina poeiras e gases.
- ✓ Controlar a umidade e temperatura do ar.
- ✓ Controle do funcionamento dos equipamentos térmicos (motores a combustão interna).
- ✓ Manutenção de temperatura e umidade adequadas ao trabalho humano.
- ✓ Manutenção do sistema e operação de forma regular e contínua.

Além dos fatores operacionais a ventilação de mina tem papel relevante a segurança operacional e condição básica a continuidade de desenvolvimento e operação das operações mineiras. Os primeiros registros de consequências graves do calor excessivo aconteceram nas minas da África do Sul em 1924. Minas pouco mecanizadas demandam maior esforço físico e apresentam maior exposição aos fatores de riscos; conseqüentemente, são mais propensas a acidentes. Acidentes, historicamente, afetam uma grande quantidade e pessoas. Entre estes acidentes ocorridos por questões relacionadas a ventilação temos : Codelco Mina Teniente em

1965, ocorreu intoxicação por fumos oriundos do desmonte de rocha por haver portas de ventilação abertas; Em 1977 na mina Teniente ao inspecionar uma frente de sondagem ocorreu a redução da concentração do oxigênio para 13 % (Codelco, 1994); Istambul em 2014 um incêndio em mineradora de carvão matou 245 trabalhadores e deixou escapar alta concentração de monóxido de carbono no ar para o ambiente (Martins, 2016); Em 10 de setembro de 1984, uma violenta explosão causada por gás metano matou 31 operários na mina de carvão Plano 2, da antiga CCU, na comunidade de Santana, em Urussanga, no estado de Santa Catarina. A mina possuía profundidade de 80 metros e foi a maior tragédia na história da mineração no Brasil (G1, 2014).

### 2.1.2 Características do ar subterrâneo

Costa (2017) relata que o ar atmosférico ao percorrer, no interior das minas, as galerias e frentes de trabalho, sofre uma série de alterações químicas e físicas, provocando mudanças na sua composição, com diminuição do conteúdo de oxigênio, geralmente acompanhada do aumento da quantidade de 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.

É denominado ar fresco como sendo o ar da mina respirável, que apresenta composição aproximada a do ar atmosférico normal. Por outro lado, chama-se ar contaminado/viciado, o ar impróprio para a respiração, também chamado de ar de retorno, por já ter atravessado as frentes de trabalho.

Para efeitos de estudos de concentração de gases o ar que respiramos é uma mistura, que em estado puro e seco, possuindo a seguinte geralmente composição conforme Tabela 2.1.

Tabela 2.1- Composição média percentual do ar seco. (Hartmann, 1982).

Componente	Conteúdo (% por volume)	Conteúdo (% por peso)
Nitrogênio	78,09	75,55
Oxigênio	20,95	23,13
Argônio e outros gases raros	0,93	1,27
Dióxido de carbono	0,03	0,05

O ar atmosférico sempre contém vapor de água em quantidades variáveis entre 0,1 a 3,0 % em volume, que não afeta a relação oxigênio-nitrogênio, e tem importância particular nas propriedades psicrométricas que tem relação com o controle da temperatura e umidade. Para efeitos práticos, o ar pode ser considerado por 21 % de oxigênio e 79 % de nitrogênio e outros gases inertes. Este ar normal ao entrar na mina, sofre alterações em sua composição; por este motivo a quantidade de oxigênio diminui e aumenta a quantidade de nitrogênio e dióxido de carbono, além disso são adicionados diversos gases e poeira em suspensão, resultado dos trabalhos de lavra.

### 2.1.3 Contaminantes no ambiente subterrâneo

Para a ventilação há o princípio de entrada de ar respirável, ou seja, aquele que apresenta condições próprias para a saúde humana, e saída do ar com impurezas/contaminantes. Os contaminantes ambientais são substâncias indesejáveis, que normalmente não estão presentes no ar puro. No ambiente de mina subterrânea os contaminantes mais comuns são classificados como poeira e gases tóxicos.

Segundo as normas brasileiras (NR 15 e NR 22) o limite de tolerância de um gás no ambiente confinado de um trabalhador é a máxima concentração em média aritmética, suportada pelo trabalhador durante 48 horas semanais respiradas, sendo a caracterização de insalubridade diagnóstica quando o teor dos gases estiver acima do limite de tolerância.

Os gases tóxicos são contaminantes da atmosfera da mina e um bom sistema

de ventilação é essencial para sua retirada, em que geralmente estes gases são provenientes da própria rocha local (geologia), desmonte com uso de explosivos rocha sendo os gases principais gerados o CO<sub>2</sub>, CO e NO<sub>x</sub>, e o uso de máquinas a diesel principalmente o CO e NO<sub>x</sub>.

Entre os gases presentes no ambiente subterrâneo e mais relevantes, pelos efeitos nocivos que produzem no organismo são: metano (CH<sub>4</sub>), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), hidrocarbonetos não oxidados e parcialmente oxidados, amônia (NH<sub>3</sub>), gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S) e dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), mesmo sob condições normais que juntos não correspondem a 0,1% (Vutukuri & Lama, 1986), a Tabela 2.2 mostra os limites de tolerância dos principais gases em minas subterrâneas, conforme estabelecido pela NR 15.

Tabela 2.2- Limites máximos permissíveis para gases. (NR 15, 1978).

Gases	Limites de Tolerância
CO	39 ppm
CO <sub>2</sub>	3900 ppm
NO <sub>x</sub>	4 ppm
H <sub>2</sub> S	8 ppm
SO <sub>2</sub>	4 ppm
NH <sub>3</sub>	20 ppm

Em minas de carvão e jazidas sedimentares como a de potássio por exemplo, o metano (CH<sub>4</sub>) é encontrado com certa frequência nas frentes de serviço. O triângulo de Coward são expressas as regiões onde percentual de concentrações de metano com o oxigênio do ar podem se tornar explosivas, conforme Figura 2.1.

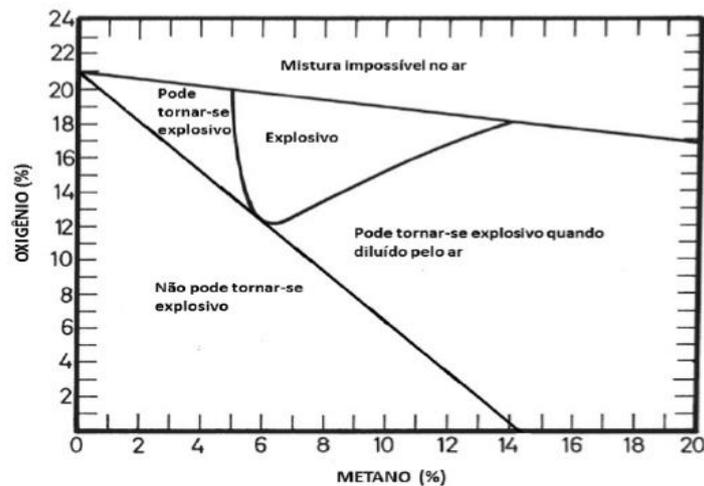


Figura 2.1- Diagrama do triângulo de Coward. (Bonetti, 2017).

A poeira é um contaminante que sua inalação causa geralmente problemas pulmonares. Em geral todas as operações minerais são geradoras de poeira tais como: desmonte de rocha, perfuração em seco, extração de minério/suspensão de particulado. A ventilação é um recurso para reduzir as concentrações de poeira ambiental que causam problemas para a saúde, que caso não sejam suficientes no ambiente subterrâneo deve-se empregar outras técnicas conhecidas como: umidificação, filtro de ar antes das fontes indesejadas, jateamento das galerias com água para redução da geração de particulados e diluição com ventilação secundária (Gancev, 2006).

#### 2.1.4 Circuitos básicos de ventilação

O fluxo de ar existente entre diferentes pontos de uma mina é causado por uma diferença de pressão. As diferentes pressões existentes em pontos distintos da mina são geradas por fontes naturais ou mecânicas. A principal fonte natural que pode criar e manter um fluxo significativo de ar é a energia térmica resultante de diferenças de temperatura que ocasiona alterações de densidade do ar em setores distintos da mina. O fluxo causado por este fenômeno físico recebe a denominação de ventilação natural, e a pressão que o gera chama-se pressão de ventilação natural, mais conhecida como pressão de ventilação natural (PVN) ou traduzida *natural ventilation pressure* -NVP (Costa, 2017).

As fontes mecânicas geradoras de fluxo de ar são principalmente os ventiladores, além de compressores e injetores que poderão eventualmente ser usados. Um ventilador eleva a pressão do ar no seu lado de saída para um valor acima da pressão do ar no seu lado de entrada. O fluxo de ar resultante da utilização destes equipamentos recebe a denominação de ventilação mecânica ou ventilação artificial, sendo este tipo de fluxo, na maioria dos casos, o principal componente de um sistema de ventilação de mina (Costa, 2019).

A maior parte das minas usam a ventilação ascendente das frentes de trabalho. Neste sistema de ventilação, o ar puro é dirigido diretamente para os locais mais baixos da mina e ascende através das frentes antes de retornar à superfície. Na ventilação descendente, o ar puro descende através das frentes de trabalho, sendo recolhido nas seções da base da mina e dirigido diretamente para a superfície.

Ao se desenhar um sistema de ventilação, deve-se considerar galerias independentes, como entradas e saídas para a injeção de ar respirável aos níveis que precisamos e retorno do ar contaminado. É sempre válido notar os limites da velocidade excessiva nas entradas de ar, pois não observando a essa restrição há a possibilidade do levantamento de poeira depositada, o que não é uma função do processo de ventilação.

Existem basicamente dois tipos de ventilação para uso em minas que são a ventilação natural e ventilação mecanizada. A ventilação natural que foi utilizado durante muito tempo em minas no passado, deve seu princípio à entrada de ar ser causada pela diferença de pressão natural, ou seja, diferenças de pressão barométrica e altura na entrada do poço/rampa da mina, sem usos ventiladores ou sistemas mecanizados mostrado na Figura 2.2.

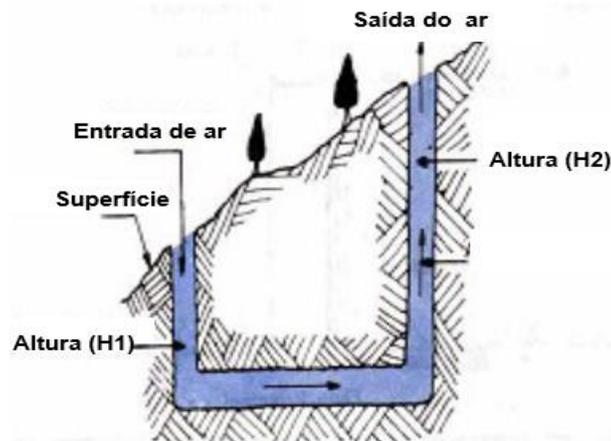


Figura 2.2- Desenho esquemático da ventilação natural. (Adaptado Galan, 2011).

Sabendo que a ventilação natural por si só não é eficiente e há diversas variáveis a controlar, há de se fazer o uso da ventilação mecanizada. Este método utilizado o uso de ventiladores de grande dimensão, ofertando vazão de ar ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) ou fluxo de ar ( $\text{Kg/s}$ ) as frentes de lavra e apoio (fluxo de ar devido às diferentes densidades de ar do ambiente subterrâneo). O elemento mecânico que permitiu o desenvolvimento e criação do sistema mecanizado foi o uso de ventiladores industriais. Este move quantidades de ar de um ponto a outro vencendo a resistência das galerias mediante o aporte permanente de energia, de forma a manter a vazão de ar em forma da pressão estática e cinética, gerada e entregue pelo motor elétrico.

A quantidade do fluxo de ar necessária para as minas atuais é sem dúvida expressiva, desta forma o consumo de energia elétrica é acentuado, sendo desta forma um dos maiores custos operacionais da mina, tornando sua verificação, análise, manutenção importantes para o processo como um todo. Para este sistema há o uso de dutos e ventiladores que levam ar fresco para as frentes lavra, e retorno do ar contaminado para a exaustão da mina, ilustrado em na Figura 2.3. Para se exercer o controle do fluxo de ar, torna-se necessária a utilização de diversos artifícios, tais como: paredes de alvenaria, cortinas, portas de ventilação (simples e duplas), reguladores etc.

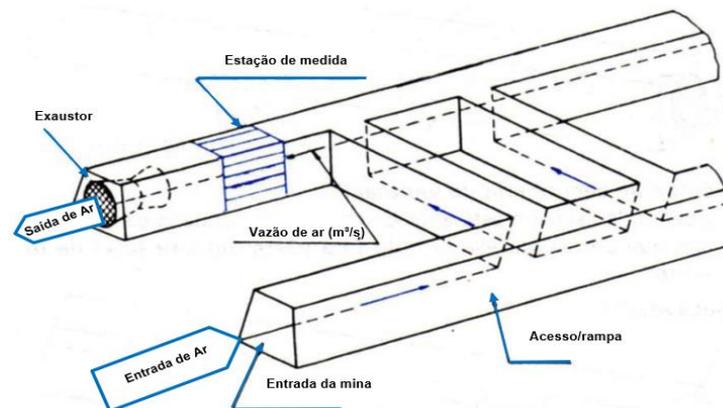


Figura 2.3- Esquema de ventilação mecanizada. (Adaptado de Galan, 2011).

Para circuitos de ventilação podem ser considerados dois tipos básicos de ventilação denominado de: principal e secundária/auxiliar. A ventilação principal utiliza-se de ventiladores principais que irão forçar o ar através do circuito de ventilação. Este circuito é formado por galerias de entrada de ar, galerias de retorno de ar impuro, e os tapumes, paredes, portas, pontes e reguladores que completam o sistema.

Apesar da maioria das frentes de trabalho serem percorridas pelo fluxo geral de ar, haverá normalmente alguns locais, tais como, frentes de desenvolvimento, estações de carregamento de shaft, que necessitarão de ventilação auxiliar. Este tipo de ventilação requer um ventilador adicional e uma rota própria para o ar, que é geralmente um duto de ventilação.

Costa (2019) traz o princípio da ventilação secundária/auxiliar baseando-se na entrada e saída do ar ajudada mecanicamente por um ventilador em comunicação ao ambiente de superfície, já a ventilação secundária faz uso de dutos e ventiladores auxiliares para que possa direcionar fluxo de ar para áreas restritas ou a distâncias grandes (superiores a 1.000 m), e bem como realizada à retirada de ar viciante/contaminante, fazendo uso de dutos de ventilação, conforme a Figura 2.4.

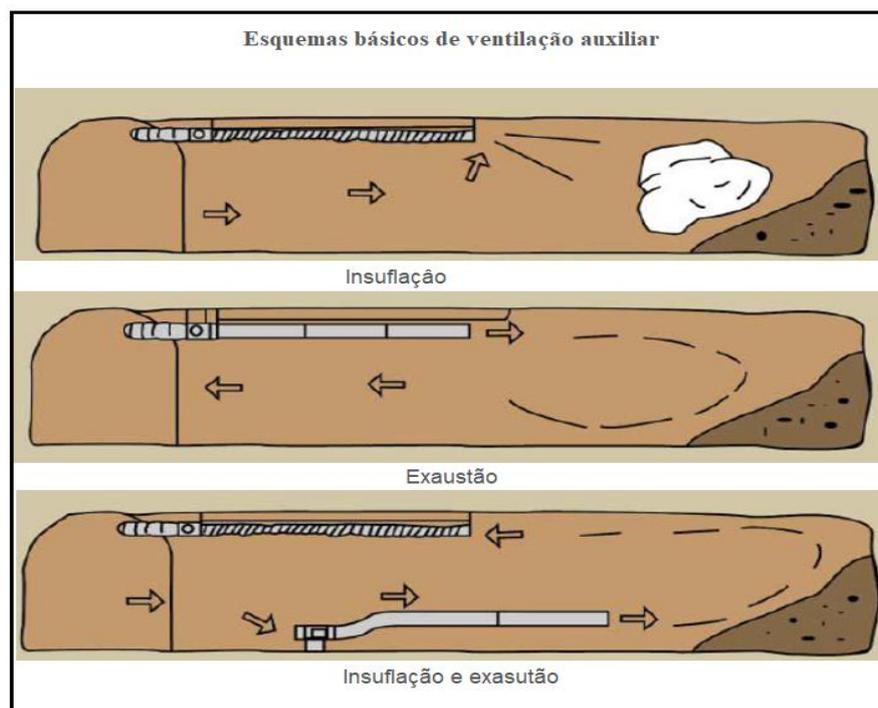


Figura 2.4- Sistema de ventilação secundária/auxiliar. (Adaptado Alegria, 2015).

A ventilação auxiliar pode ser executada de três maneiras diferentes:

✓ Soprante/insuflação: quando uma parte do ar puro da galeria que dá acesso ao desenvolvimento é forçada por um ventilador através de um duto de ventilação até a frente do desenvolvimento, de onde retorna à corrente principal. A entrada do duto deverá se estender, pelo menos 5m, no sentido contrário à corrente de ar, para evitar que o ar usado, proveniente da frente de desenvolvimento, seja re-circulado.

✓ Sistema Aspirante/exaustão: quando o ar próximo da frente do desenvolvimento é aspirado através de um duto de ventilação e automaticamente substituído pelo ar puro puxado da galeria. Do mesmo modo, para evitar a recirculação, a descarga do ar de retorno deverá ser feita o mais longe possível (ao menos 5,0 m) da entrada do desenvolvimento.

✓ Sistema Misto (insuflação + exaustão): quando se sobrepõe um duto auxiliar soprante ao sistema aspirante ou um duto auxiliar aspirante ao sistema soprante.

A Figura 2.5 mostra o formato do circuito de ventilação que tem como função conduzir o ar novo até as frentes de trabalho mais distantes na quantidade suficiente para atender às necessidades, deve-se levar em consideração que para isso será

necessário superar as resistências ao deslocamento do ar através das galerias e nos obstáculos como máquinas, obstruções por entupimento de galerias. Quanto maior for a resistência ao deslocamento do ar menor será a quantidade de ar impulsionada pelo ventilador.

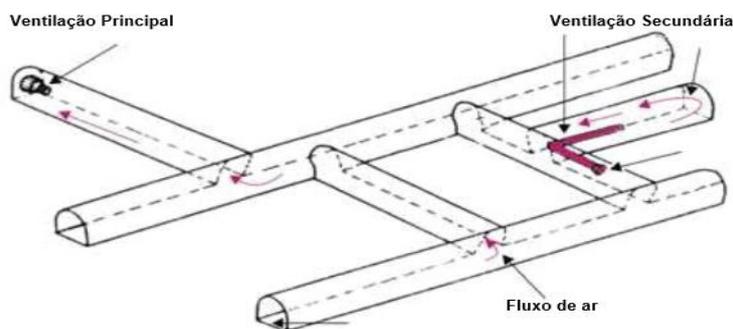


Figura 2.5- Ventilação principal e secundária. (Adaptado Galan, 2011).

Outra função do circuito principal é a exaustão do ar contaminado e/ou poeira das frentes de lavra, retornando pela galeria através de dutos de saída e/ou poço de exaustão. A respeito do circuito secundário, este apresenta como função a condução através de dutos do ar puro e refrigerado pelas plantas até as frentes de trabalho. Este ar que é conduzido será utilizado na respiração do trabalhador, diluição dos gases e diminuição da temperatura. Sua outra função é a exaustão da poeira presente nas frentes de lavra.

Para o método de câmaras e pilares uma das formas mais comuns para o circuito de ventilação é o sistema bidirecional (W) e sistema unidirecional (U) (McPherson, 2011), especificados na Figura 2.6.

- a) Sistema bidirecional: Sistema de ventilação no qual o ar desloca através de um ou mais pontos centrais com retorno de exaustão em dois pontos.
- b) Unidirecional: Sistema de ventilação com entradas de ar e retornos em lados opostos do painel de lavra.

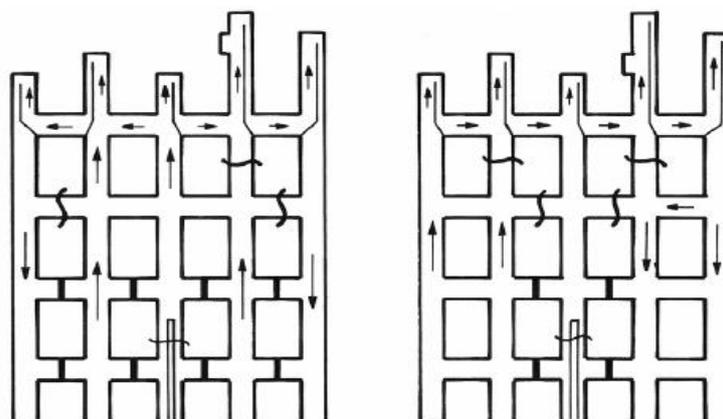


Figura 2.6- Ventilação principal e secundária para câmaras e pilares. (McPherson, 2011).

Para ambos os circuitos o sistema de ventilação para método de lavra de câmaras e pilares, é prática é comum realizar o deslocamento do fluxo de ar pela extremidade da face, por meio de coquilhas suspensas e fixadas no teto ou no chão, com certa folga em cortes transversais para permitir a passagem de equipamentos

#### 2.1.5 Controle e medição de perdas de ar

As perdas de ar por fugas no circuito representam um sério problema que afeta o funcionamento de todo o circuito de ventilação, culminando com a qualidade. Os principais problemas que afetam o sistema de ventilação são: baixa capacidade dos ventiladores instalados, excesso de área aberta/lavrada, distância das frentes de lavra ao circuito de ventilação principal, dificuldade técnica de regulação dos ventiladores, instalação de ventiladores fora ao projeto e cruzamento de fluxo de ar.

Os cruzamentos de fluxo de ar (*crossings*) são as maiores fontes de perda nos arranjos de ventilação de mina. Entretanto, é um componente essencial do arranjo. Portanto, cruzamentos bem planejados e desenhados podem minimizar a quantidade de perdas que são inevitáveis devido às características de forma das configurações de cruzamentos, que, por sua vez, podem reduzir o custo da ventilação principalmente ao gasto de energia.

É sempre necessário o uso de reguladores de distribuição para o fluxo de ar conforme, sendo esta metodologia. Como exemplos de reguladores temos as portas,

cortinas, tapumes de correia, que são elementos mecânicos físicos permitindo redirecionar e reduzir as perdas de ar, a fim de aproveitar o máximo de ar insuflado para a mina, em virtude de locais que estejam abertos como: travessas para exploração, painéis desativados, galerias sem uso operacional por exemplo. Estes reguladores estão sujeitos a deterioração natural e atrelado a um manejo operacional inadequado, que pode resultar em perdas de ar para o circuito principal. A Figura 2.7 ilustra alguns sistemas de reguladores e distribuição de ar e ventilação de mina.

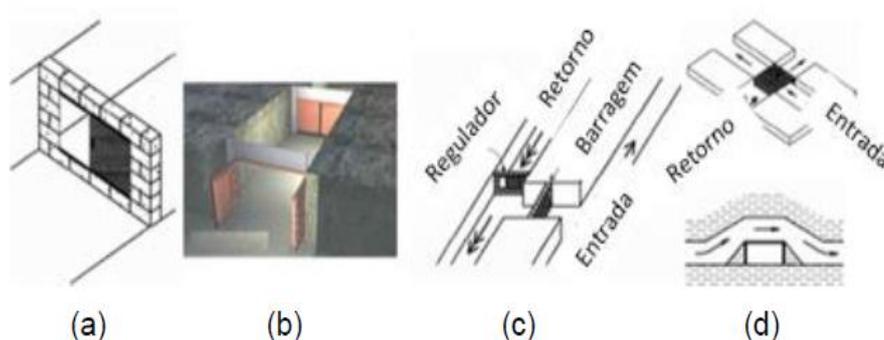


Figura 2.7- (a) Modelo de regulador, (b) Modelo de portas, (c) Modelo de regulador, (d) Modelo de cruzamento de ar. (Cardoso, 2014).

Para que seja efetivo o uso destes controladores deve-se sempre controlar os pontos de perdas de ar no circuito de medição, com um plano de manutenção das portas, cortinas e tapumes, como também atrelar ao aspecto comportamental e educacional sobre a importância e bom uso destas ferramentas. As portas metálicas, por exemplo, têm como função principal evitar a circulação de ar em um circuito de ventilação e contra incêndio evitando a propagação de gases em ambiente subterrâneo.

As portas são utilizadas comumente em locais onde a pressão do ar é muito alta, por exemplo, próximo aos ventiladores principais. A abertura de uma porta provoca um curto circuito entre o canal de entrada e o canal de saída, perdendo-se uma quantidade muito grande de ar. Nestes casos usam-se duas ou mais portas, ou seja, quando se abre uma, há pelo menos outra fechada evitando o curto circuito de ar. Para diminuir a pressão exercida pelo ventilador nas portas, usualmente utiliza-se janelas de decompressão nas mesmas, gerando menos esforço para abri-la.

Para controle da ventilação medições mensais de velocidade, vazão,

temperatura de bulbo seco e úmido devem ser realizados, contemplando no mínimo, entradas da ventilação, frentes de lavra e desenvolvimento e o ventilador principal, que podem ser feitos com anemômetros, e psicrômetros. Minas com presença de grisu, gases tóxicos, explosivos ou inflamáveis, o controle de concentração deve ser feito a cada turno nas frentes de trabalho em operação e em outros pontos importantes da ventilação.

A velocidade do ar no subsolo não deve ser inferior a 0,2 (zero vírgula dois) m/s nem superior à média de 8,0 m/s (oito metros por segundo) onde haja circulação de pessoas, sendo que em minas de carvão a velocidade do ar não deve ser superior a 5,0 m/s (cinco metros por segundo), sendo que em casos especiais, a ANM pode aprovar, ouvida a Instância Regional do MTE, aumento do limite superior para 10,0 m/s (dez metros por segundo). Os critérios para o planejamento da velocidade do ar foram estabelecidos por várias entidades como a *Mine Ventilation Society*, que estabelece velocidades ótimas do ar conforme Tabela 2.3.

Tabela 2.3- Velocidade de ar recomendado. (Machado, 2011).

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

Porém necessita-se estabelecer uma velocidade máxima a fim de evitar suspensão de particulados. A Figura 2.8 mostra o registro de velocidade em alguns pontos de uma mina subterrânea, com método de lavra de câmaras e pilares.

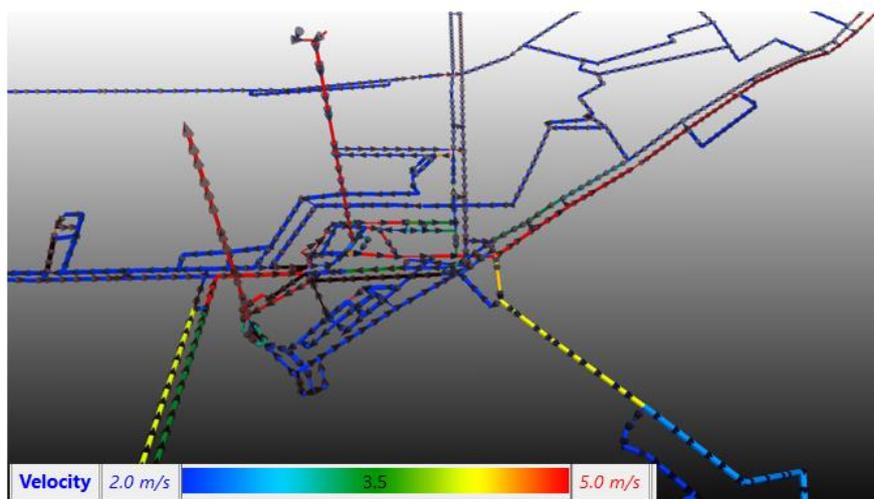


Figura 2.8- Cadastro de velocidade de ar na mina. (Contribuição do autor, 2020).

As estações de medição e coletas de dados de ventilação devem ser instaladas ao longo do percurso do ar, localizado antes e depois das ramificações das galerias. Junto às estações devem ser afixados quadros com os resultados obtidos nas medições conforme Figura 2.9.

GER. OPERA. E INFRA.	
SUPERVISÃO VENTILAÇÃO	
PONTO MED.: A6	ÁREA: 15.98 m <sup>2</sup>
META DO PONTO	
TEMP.:	VAZÃO:
PRESSÃO BARO:	
MEDIDA DO PONTO	
TEMP.: 20.2	VAZÃO: 27.10%
PRESSÃO BARO:	1079.2
DATA: 15-02-2020	TURNO: A
INSPECTOR: FRED LUCAS	

Figura 2.9- Resultado do ponto de vazão em dado ponto da mina. (Contribuição do autor, 2020).

Outro caso que deve ser sempre visto e analisado é a recirculação de ar no circuito de ventilação, que pode ser definida como qualquer parte do fluxo de ar da mina que passa pelo mesmo ponto mais de uma vez ocorrendo também contaminação entre o ar fresco e o contaminado, sendo essa recirculação uma das grandes causadoras de aquecimento das minas.

Costa (2019) menciona que o ar recirculado tem uma série de consequências indesejáveis e possivelmente perigosas.

- ✓  $Q(\min)$  = vazão mínima de ar requerida no ponto, em  $m^3/s$ .
- ✓ Acumulação de calor e umidade: á medida que o ar recircular, ele absorve o calor dos equipamentos, estratos de rocha e ventiladores cada vez mais em cada passagem. A presença de águas subterrâneas e as operações mineiras provocam o aumento da umidade da mina.
- ✓ Formação de gases e poeira: o ar recirculado contribui para o acúmulo de vapores e poeira.
- ✓ A circulação de gases provenientes da detonação pode muitas vezes impedir a reentrada em áreas detonadas por longos períodos, atrasando a produção e outras atividades.
- ✓ O acúmulo de gás, em particular nas minas de carvão, pode criar um ambiente perigoso, propenso a explosão ou envenenamento de pessoas.

#### 2.1.6 Fundamentos físicos da ventilação

A ventilação de mina é um exemplo de um processo de fluxo fixo ou estacionário, ou seja, o fluido encontra-se continuamente em movimento seguindo uma direção linear através de um conduto. Tal processo envolve trocas e perdas de energia entre duas seções quaisquer do caminho percorrido pelo fluxo. Alguns aspectos e princípios físicos que determinam o comportamento do fluxo de ar em um sistema de ventilação podem ser resumidos:

- ✓ Equação da continuidade ou conservação da massa: Válida para processo de fluxo fixo, a equação de continuidade diz que a vazão de um fluido, em qualquer ponto ao longo do caminho por ele percorrido, permanece constante. Assim temos que pela equação (2.1):

$$\rho_1 * A_1 * V_1 = \rho_2 * A_2 * V_2 = \rho_i * A_i * V_i \quad (2.1)$$

Em que:

- $\rho$  = densidade do ar no ponto  $i$  ( $Kg/m^3$ ).
- $A_i$  = área do fluxo, normal à sua direção, no ponto  $i$  ( $m^2$ ).
- $V_i$  = velocidade do fluxo no ponto  $i$  ( $m/s$ ).

✓ Equação de energia: O ar em movimento possui energia decorrente da pressão sob a qual ele se encontra, da sua velocidade, e da sua altura acima de um determinado nível de referência. Essas formas de energia (estática, cinética e potencial), quando expressas por unidade de peso do ar, resultam em carga. Se uma determinada massa de ar é sujeita a uma pressão  $P$ , movendo-se com uma velocidade  $V$  e tendo seu centro de massa a uma altura  $H$  acima de um nível de referência de energia potencial, então a carga total em metros é dada pela equação (2.2):

$$P/(\rho * g) + \frac{V^2}{2g} + H \quad (2.2)$$

Em que:

- $\rho$  =densidade do ar no ponto  $i$  (Kg/m<sup>3</sup>).
- $g$ = aceleração da gravidade (m<sup>2</sup>/s)
- $V_i$ = velocidade do fluxo no ponto  $i$  (m/s).
- $H$ =Altura (m)

✓ Equação de Bernoulli: A aplicação da Equação de Bernoulli estaria limitada, em princípio, para fluido ideal e incompressível, o que, não sendo o caso do ar, torna necessária a consideração de alguns aspectos relativos ao seu uso em ventilação de minas. No que diz respeito à compressibilidade, pode-se demonstrar que para o ar em torno da pressão atmosférica com mudanças de altura inferiores a 500 m, e mudanças de velocidade que não excedam 100 m/s, a equação de Bernoulli não produz erros..

✓ Número de Reynolds: Quanto às trajetórias das partículas de um fluido em movimento, no que diz respeito ao ordenamento e regularidade destas trajetórias (linhas de fluxo), a vazão do fluido pode se apresentar nos estados laminar, turbulento ou intermediário. Para a determinação das fronteiras destes estados, adota-se o número de Reynolds ( $Re$ ), que é função das propriedades do fluido. Segundo Hartman (1982), o fluxo é laminar quando  $Re < 2000$ , enquanto para  $Re > 4000$ , o fluxo é turbulento. A região entre estes valores é conhecida como faixa intermediária. Outros autores consideram o valor de  $Re = 2500$  como limite inferior para fluxo turbulento. A equação (2.3) mostra o cálculo para o número de Reynolds:

$$Re=(\rho * D * V)/(\mu) \quad (2.3)$$

Em que:

- Re = número de Reynolds (adimensional).
- $\rho$  = densidade do ar (Kg/m<sup>3</sup>)
- $\mu$  = viscosidade absoluta (Pa.s ou Kg/m.s)
- D=diâmetro do duto (m).
- V= velocidade do fluxo (m/s).

✓ Resistência a ventilação: A energia fornecida a um sistema de ventilação, necessária para a criação da diferença de pressão entre dois de seus pontos, é consumida ao vencer as resistências que as galerias e os diversos trabalhos mineiros opõem ao fluxo de ar existente entre os pontos considerados. Destas resistências resultam perdas ou quedas de pressão. Estas perdas de pressão são compostas das perdas por fricção e das perdas por choque. Portanto a equação (2.4) mostra a resistência da ventilação:

$$p=(pf + px) \quad (2.4)$$

Em que:

- $pf$  =perda de pressão por fricção (Pa)
- $px$  = perda de pressão por choque (Pa)

✓ Perda de pressão por fricção ( $pf$ ): A perda de pressão por fricção em um determinado trecho de galeria é função da velocidade do fluxo, das características de superfície das paredes (tipo de rocha, rugosidade etc.) e das dimensões e forma (comprimento, perímetro e área seccional) do trecho considerado. Esta perda de pressão é obtida pela equação de Atkinson, mostrada pela equação (2.5):

$$pf=(K * L * C * V^2)/(A) \quad (2.5)$$

Em que:

▪ K =fator de fricção (Kg/m<sup>3</sup>). Obs: Uma determinação mais precisa do fator de fricção K é feita por meio da medição da queda de pressão em uma galeria (ou trecho dela) e dos outros elementos considerados na equação de Atkinson para o trecho subterrâneo em questão

- L =comprimento da galeria (m).
- C= Perímetro da galeria (m).
- V= velocidade do fluxo de ar (m/s).

- $A =$  área da seção transversal da galeria ( $m^2$ ).

✓ Perda de pressão por choque ( $p_x$ ): As perdas de pressão por choque são as que ocorrem em virtude de mudanças de direção, mudanças na área de seção transversal ou obstruções sofridas pelo fluxo de ar, em sua passagem no circuito de ventilação. A queda de pressão provocada por uma fonte de perda por choque varia com o quadrado da velocidade do fluxo de acordo com a equação 2.6:

$$p_x = (\theta \cdot \rho \cdot V^2) / 2 \quad (2.6)$$

Em que:

- $\theta =$  fator de perda por choque (adimensional). Obs: O fator de perda  $\theta$  é específico para cada fonte de perda, ou seja, cada curva, mudança de área ou obstrução tem seu próprio fator de perda, dependendo de suas dimensões e características.

- $\rho =$  densidade do ar ( $Kg/m^3$ )

- $V =$  velocidade do fluxo de ar ( $m/s$ ).

Obs: O cálculo direto das perdas por choque, entretanto, é raramente utilizado em ventilação de mina, em virtude da grande variedade na natureza das perdas e do tempo requerido neste tipo de cálculo. As perdas por choque são usualmente assimiladas nas perdas por fricção, através de um incremento no fator de fricção  $K$ , ou através da substituição de cada perda por choque por um comprimento de galeria retilínea equivalente.

### 2.1.7 Vazão de ar

Dentre da operação para circuito de ventilação um dos princípios básicos e necessários a qualquer dimensionamento é o requerimento de vazão necessária a uma dada frente de lavra. A vazão mínima necessária ao ambiente subterrâneo é calculada pela soma parcial das vazões mínimas a quantidade de trabalhadores presentes  $Q_h$  ( $m^3/s$ ), situação do conforto térmico  $Q_t$  ( $m^3/s$ ), concentração de gases  $Q_g$  ( $m^3/s$ ), e poeiras ou particulados  $Q_p$  ( $m^3/s$ ).

Existem vários critérios e fórmulas, para a determinação da vazão de ar necessário, baseado por exemplo em número de pessoas laborando, tipo e quantidade

de explosivo, geração e quantidade de poeira, velocidade mínima da corrente de ventilação para evitar suspensão dos gases, diluição de gases gerados por equipamento a diesel.

De acordo com Torres (2005) o principal parâmetro para o dimensionamento da ventilação está relacionado ao uso de equipamentos a diesel e a operação de desmonte de rocha. As emissões dos motores diesel incluem os hidrocarbonetos (HC), o monóxido de carbono (CO), os gases nitrosos (NOx) e a matéria particulada de diesel (MPD). Os compostos tóxicos, como os hidrocarbonetos poliaromáticos (HAPs), também são encontrados na exaustão do motor diesel e podem ser associados com as emissões do DPM e do HC.

A equação (2.7) é utilizado no caso de uso simultâneo de mais de um veículo ou equipamento a óleo diesel com teor de enxofre acima de 50 ppm ou que operem com motores diesel que não tenham padrões de emissão aceitáveis pela fase P7 do Proconve - Programas de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores, já a equação (2.8) utilizada no uso simultâneo de mais de um veículo ou equipamento a óleo diesel com teor de enxofre acima de 50 ppm ou que operem com motores diesel que não tenham padrões de emissão aceitáveis pela fase P7 do Proconve - Programas de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores,

$$QT = 2,65 (P1 + 0,75 * P2 + 0,5 * Pn) \quad (2.7)$$

$$QT = 3,50 (P1 + 0,75 x P2 + 0,5 x Pn) \quad (2.8)$$

Em que:

- ✓ QT= vazão total de ar fresco em metros cúbico por minuto.
- ✓ P1= Potência do equipamento a diesel em KW.
- ✓ P2= potência em cavalo-vapor do equipamento de segunda maior potência em operação.
- ✓ Pn= somatório da potência em cavalo-vapor dos demais equipamentos em operação.

#### 2.1.8 Norma regulamentadora brasileira para ambiente subterrâneo

No Brasil os critérios para calcular o fluxo total de ar fresco nas minas

subterrâneas são aqueles determinados pela legislação brasileira através da Norma Regulamentadora 22, Portaria número 2.037, de 15 de dezembro de 1999, parágrafo 22.24 (Ventilação em Atividades de Subsolo), além da NR 15 que preconiza exigência de correntes mínimas de ar que devem ser providas. A legislação brasileira estabelece valores limite de tolerância para agentes ambientais do ar, tais como gases, vapores, poeira mineral e condições de temperatura ambiente. Além das normas reguladoras de mineração, há a Portaria 237 da ANM datada de 19 de outubro de 2001, capítulo 6. Em geral todas estas (NR 15, 22 e portaria 237) estabelecem que os sistemas de ventilação devem atender pré-requisitos básicos como:

- ✓ Suprimento de oxigênio mínimo de pelo menos 2 m<sup>3</sup>/s por pessoa e equipamentos.
- ✓ Renovação contínua de ar.
- ✓ Diluição eficaz de gases inflamáveis ou nocivos e de poeiras do ambiente de trabalho.
- ✓ Temperatura e umidade adequadas ao trabalho humano.
- ✓ Operação de modo contínuo e operante.
- ✓ Localização, vazão e pressão dos ventiladores principais.
- ✓ Direção e fluxo de ar.
- ✓ Localização e função de todas as portas, barricadas, cortinas, diques, tapumes e outros dispositivos de controle do fluxo de ventilação.

As condições subterrâneas, às quais os funcionários são submetidos podem produzir um metabolismo desequilibrado e, por esta razão, têm que ser controladas. Um dos principais parâmetros é a IBUTG °C (índice de bulbo úmido – termômetro de globo - obtida pela equação 2.3, de acordo com a Norma Regulamentadora 15 da Portaria 3.214/78, que estabelece que a exposição ao calor deve ser avaliada através do Índice de bulbo úmido – termômetro de globo (Ministério do trabalho e emprego, 1978). O cálculo da temperatura IBUTG é feita com carga solar (superfície) e sem carga solar (ambientes subterrâneos), neste caso as fórmulas (2.9) e (2.10), mostra o cálculo respectivamente para com carga solar (superfície) e sem carga solar subsolo).

$$IBUTG = 0,7t_{bn} + 0,3 t_g + 0,1 t_{bs} \quad (2.9)$$

$$IBUTG = 0,7t_{bn} + 0,3 t_g \quad (2.10)$$

Em que:

- ✓ tbn - Temperatura de bulbo úmido natural (em °C).
- ✓ tg - Temperatura de globo (em °C).
- ✓ tbs – Temperatura de bulbo seco (em °C).

A avaliação da exposição ao calor é feita por meio da análise da exposição de cada trabalhador, cobrindo todo o seu ciclo de exposição. Portanto, devem ser feitas medições em cada situação térmica que compõe o ciclo de exposição a que fica submetido o trabalhador. As temperaturas medidas que são a temperatura de bulbo úmido natural (tbn), a temperatura do globo (tg) e a temperatura de bulbo seco (tbs), e quando não há a exposição de carga solar direta não é necessária a medição de bulbo seco.

Para um controle adequado do balanço da ventilação, devem-se posicionar pontos de medida no circuito principal, dividindo-o em seguimentos. Assim pode-se determinar as fugas existentes em cada trecho do circuito, bem como a perda de carga associada. Outra medida importante é medir-se a vazão volumétrica na entrada e saída da ventilação nos painéis em lavra, verificando-se, assim, a possibilidade de recirculação de ar dentro do painel (Pinto, 2006).

As leituras das temperaturas devem ser iniciadas após a estabilização (cerca de 25 min) do conjunto da situação térmica que está sendo avaliada. O procedimento para medição das variáveis de conforto térmico sugerido pela (Fundacentro, 2005) diz que as avaliações devem ser feitas de forma a cobrir todo o ciclo de trabalho, caracterizando cada situação de exposição do trabalhador. As leituras de temperatura devem ser iniciadas após vinte e cinco minutos de estabilização do conjunto com o ambiente, sendo realizadas, no mínimo, três leituras. As leituras obtidas não devem diferir em  $\pm 0,2$  °C, sendo realizadas tantas leituras quanto for necessário, para que as diferenças entre as três últimas leituras.

A Figura 2.10 mostra uma forma habitual de captação destes pontos na mina em estudo, baseando nas boas práticas sugeridas.

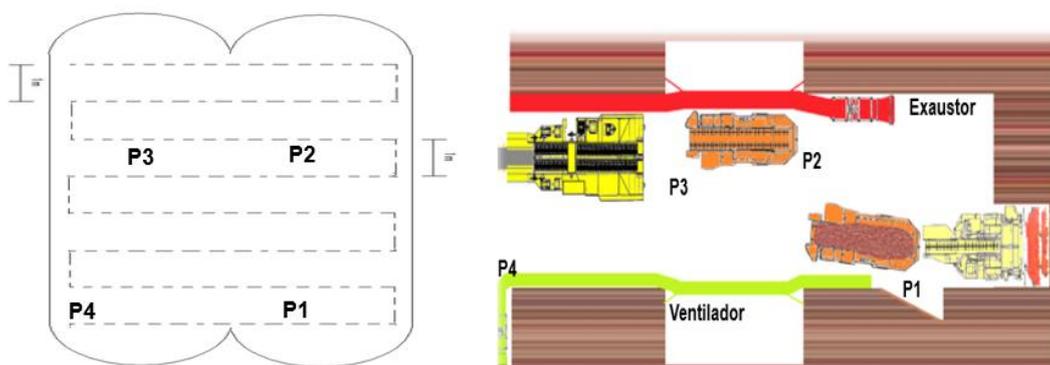


Figura 2.10- Pontos adotados para medição de temperatura na mina em estudo. (contribuição do autor, 2020).

As coletas de temperaturas podem ser coletadas por exemplo pelo psicrômetro ou TGD (termômetro de globo digital) devidamente calibrado, e adotando para isso o procedimento de pontos de coletas, com a determinação IBUTG (NTH 01 C/E, 1985), conforme Figura 2.11.

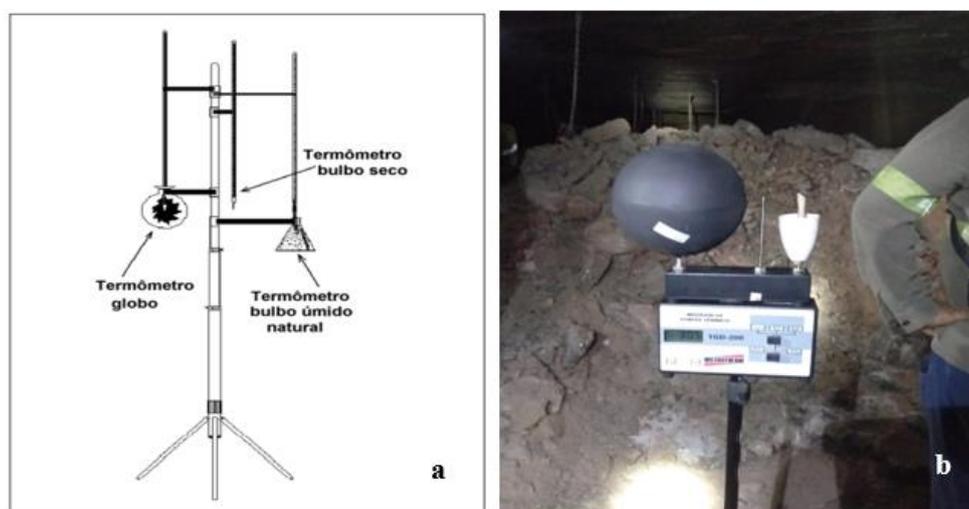


Figura 2.11- (a) modelo para determinação do índice IBUTG (NHT 01 C/E, 1985), (b) aparelho TGD 200 utilizado na mina em estudo. (Contribuição do autor, 2020)

Pela NR 15, há um limite aceitável para IBUTG depende do tipo de atividade laboral (leve, moderada ou pesada), já que esse limite afeta diretamente a taxa metabólica do calor gerado pelo corpo. Se o ambiente subterrâneo for inadequado para remover esse calor a temperatura do corpo aumentará, ocasionando desconforto que sofre os efeitos fisiológicos expressos da seguinte forma: perda de interesse nas

atividades que realiza, frequentes descansos ou folgas, desejo de concluir a atividade rapidamente, irritabilidade, redução do grau de concentração, falta de sentido e atenção, câibras de calor e até a morte.

Nas situações de trabalho (leve, moderada, pesada) a norma brasileira pontuou limites de tolerância para exposição à temperatura, em regime de trabalho contínuo, descanso no próprio local de prestação de serviço e/ou atividade somente com medidas adotadas mitigadoras de controle, conforme Tabela 2.4.

Tabela 2.4- Regime de trabalho intermitente de acordo com o IBUTG °C. (NR 15, 1978).

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

A NRM 06 de 2015 estabelece a obrigatoriedade e requisitos de sistema de ventilação para as atividades em subsolo. Essa NRM obriga as minerações subterrâneas a realizarem medições mensalmente para avaliação da velocidade vazão do ar, temperatura de bulbo seco e de bulbo úmido nos seguintes pontos: caminhos de entrada de ventilação, frentes de lavra e de desenvolvimento e ventilador principal.

Nos casos de minas com gás grisú ou com ocorrência de gases tóxicos ou inflamáveis a medição da concentração destes gases deve ser feita a cada turno, tais medidas visam controlar o sistema de ventilação e conseqüentemente avaliar se as

condições da mina estão adequadas ao trabalho em subsolo.

Nos casos de medição para aumento da temperatura acima da permitida pela NR, são adotados procedimentos de análise para o seu reestabelecimento. A Figura 2.12, informa um tipo de procedimento adotado para a mina estudada.

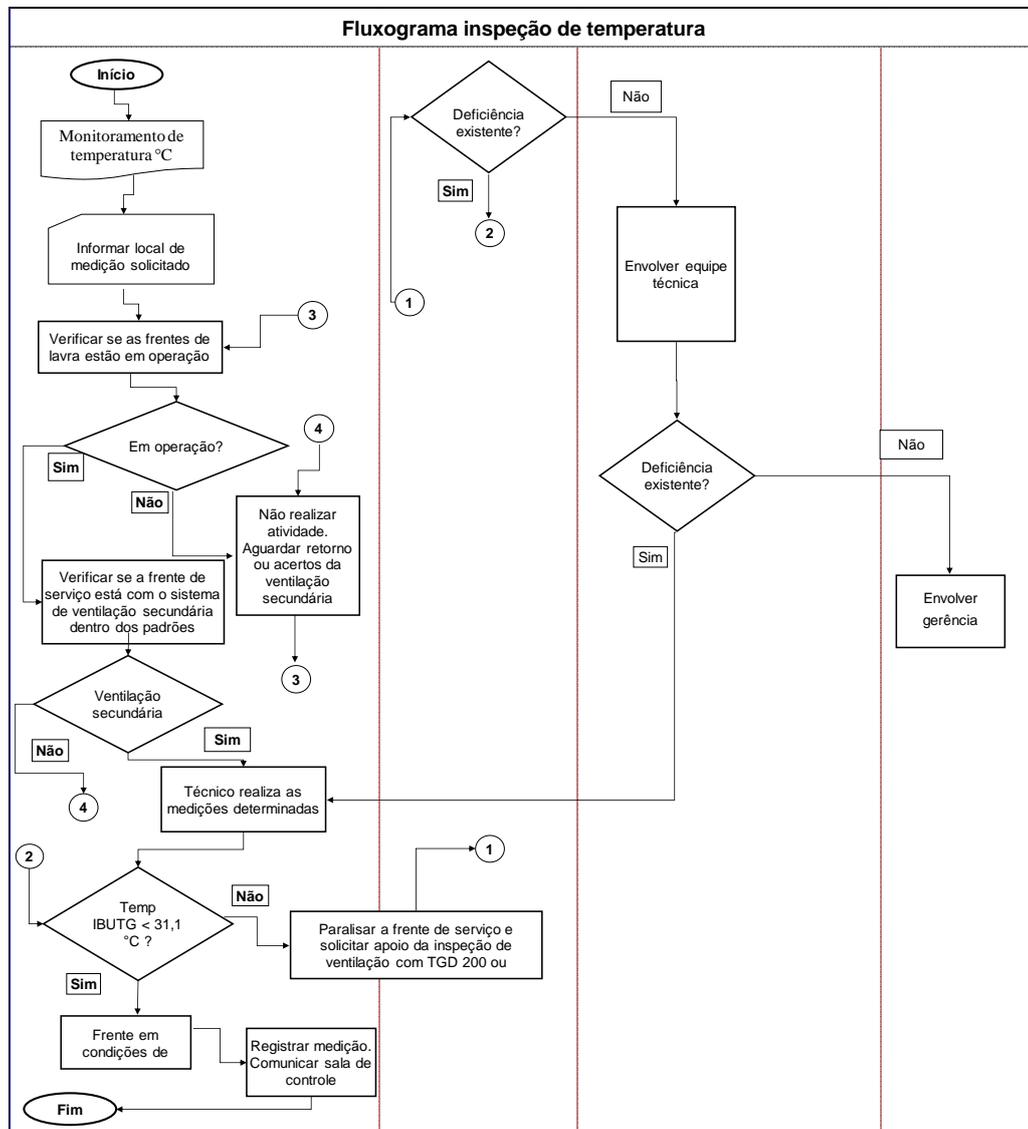


Figura 2.12- Fluxograma para medição de temperatura. (Contribuição do autor, 2020).

### 2.1.9 Conforto Térmico Subterrâneo

Um dos maiores problemas de minas subterrâneas se refere ao desconforto térmico. A literatura aponta mais de vinte e três fontes de calor em subsolo,

destacando-se o grau geotérmico da rocha, motores a combustão, o uso de explosivos, a rede de iluminação, a oxidação dos minerais, a infiltração de águas termais, movimentação do maciço, a rede de ar comprimido e a presença de trabalhadores, são algumas das fontes de calor características de uma mina subterrânea (Gancev, 2006).

O problema do conforto térmico em subsolo não só envolve as fontes de calor como também deve ser analisado em termos das condições psicrométricas, ou seja, da umidade e da velocidade do ar nas galerias e realces, além da compressão adiabática ou conhecida como auto compressão adiabática, nos poços de influxo de ar.

Torres e Gama (2005) evidenciam que o trabalho em ambiente confinado/subterrâneo exige uma série de procedimentos para garantir a condições mínimas de segurança e saúde. A exposição prolongada do homem a condições térmicas desfavoráveis conduz inevitavelmente ao aumento de temperatura, produz efeitos fisiológicos que reduzem o rendimento e podem até provocar a morte. O conforto térmico em mineração subterrânea está diretamente relacionado com a produtividade e ainda associado a acidentes e doenças térmicas.

Os efeitos das condições de temperatura e umidade inadequadas tornam os funcionários menos conscientes dos sinais visuais ao seu redor e essas reduções levam eventualmente a um ponto em que o déficit de atenção, podendo comprometer a segurança e a saúde, relacionado a possíveis acidentes.

Poulton (1970) informa que a partir de uma determinada faixa de temperatura, o rendimento do trabalhador diminui de forma rápida, com seu rendimento na atividade reduzindo de forma significativa conforme Figura 2.13. Quando um funcionário é exposto a uma temperatura superior à de conforto, esta sofre os efeitos fisiológicos expressos da seguinte forma: perda de interesse nas atividades que realiza, frequentes descansos ou folgas, desejo de concluir a atividade rapidamente, irritabilidade, redução do grau de concentração, falta de sentido e de atenção. Estes efeitos são potencializadores ao acontecimento de acidentes operacionais na mina e a doenças ocupacionais.

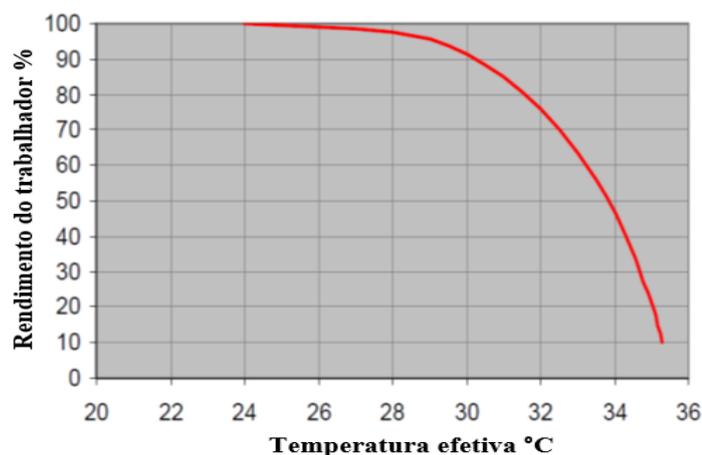


Figura 2.13- Rendimento do trabalhador x temperatura. (Adaptado Poulton, 1970).

#### 2.1.10 Simulação de Circuito de Ventilação

Em busca de contínua melhoria no circuito de ventilação a simulação com uso de softwares tem sido uma importante ferramenta para descrição para fluxo de ar nas minas, adequação aos novos desenhos de mina, e redimensionamento em virtude de equipamentos principalmente a diesel. A simulação vem proporcionando um método para prever o comportamento dos sistemas de ventilação e o valor do modelo utilizando sistemas computacionais está na verificação de informar o fluxo circulante/vazão, perdas de carga e condições térmicas da mina. Através do estudo é possível a análise de cenários e mudanças ocorridas ao longo do planejamento estratégico, e serve como base para redimensionamento dos circuitos de ventilação baseando-se nos sequenciadores da mina.

Os modelos e programas de simulação devem ser usados pela confiabilidade dos dados coletados em campo, mostrando através da simulação o verdadeiro panorama apresentado. O maior benefício em utilizar a simulação em ventilação de mina está atrelado as seguintes questões:

- ✓ Tomada assertiva de decisões, com maior previsão e análise dos circuitos de ventilação atuais e futuros.
- ✓ Estimativa, desenho e planejamento do custo de infraestrutura necessária para a ventilação.
- ✓ Dimensionamento adequado dos ventiladores e exaustores.

- ✓ Cálculo da necessidade de energia e os custos atrelados de ventilação.

Entre os softwares do mercado há o VUMA (*Ventilation of Underground Mine Atmospheres*) em que este simula condições ambientais da mina subterrânea. Este software foi desenvolvido pela *CISR Miningtek* e *Bluhm Burton Engineering* da África do Sul. O programa foi concebido para minas profundas e especificamente para ajudar no controle da ventilação, sendo sua simulação realizada em estado estacionário do fluxo de ar e simulando de forma interativa a corrente de ar.

O software VUMA utiliza o algoritmo de Hardy Cross, sendo este algoritmo é descrito um dos mais conhecidos métodos iterativos para a solução de redes malhadas. Tem como premissas as seguintes condições a ventilação de mina: a soma das vazões de cada nó deve ser igual a zero e em qualquer circuito a soma das perdas de carga deve ser igual a zero. Esse sistema resolve mediante um procedimento de interações sucessivas a partir de um sistema inicial com um número de equações igual ao número de nós do circuito, onde associado a uma carga (pressão) e há diferenças de cargas de acordo com a Lei de Kirchoff.

O software VUMA resolve interativamente a distribuição do fluxo de ar, os contaminantes e a temperatura através de um circuito de ventilação e rede de refrigeração, e utiliza de fluxo de ar compressível e utilização de cálculos termodinâmicos. O programa permite realizar um circuito de ventilação com componentes e elementos tais como: poços, estações de serviços, túneis, frentes de desenvolvimento, áreas lavradas, ventiladores, exaustores e reguladores.

## 2.2 Melhoria Contínua

### 2.2.1 Histórico

O *Lean Seis Sigma* apesar de ser uma metodologia relativamente recente na melhoria de processos, é considerado um agregado de ferramentas novas e antigas baseadas em um método rigoroso e disciplinado conhecido como (DMAIC)-Definição-Medição-Análise-Implantação/Ação-Controle, com semelhanças à metodologia PDCA tais como: ambos são métodos de solução de problemas; trabalham dentro do contexto da melhoria contínua; possuem uma fase de

planejamento-execução-controle e utilizam ferramentas quantitativas e qualitativas.

As diferenças entre o PDCA e a metodologia DMAIC, podem ser resumidas em: geralmente o PDCA utiliza ferramentas estatísticas mais simples, enquanto o método DMAIC recorre a recursos estatísticos mais avançados devido a interação com o Lean Seis Sigma; o método DMAIC possui uma fase de planejamento mais detalhada, permitindo um estudo mais aprofundado dessa etapa.

A evolução da qualidade surgiu há cerca de duzentos e quarenta anos na revolução industrial, e vem sendo remodelada e melhorada durante os dias atuais, conforme histórico abaixo:

✓ Em 1798 Eli Whitney introduziu o conceito de produção em série e peças intercambiáveis, criando um revolucionário sistema de uniformidade. Conceitos de necessidade de coerência e identificação de conceitos começaram a ser difundidos.

✓ Em 1924, Shewhart deu início a era do controle estatístico da qualidade. Com um pensamento voltado para o processo, ele criou uma forma de coletar, apresentar e analisar dados, o gráfico do controle de processos.

✓ Após a Segunda Guerra Mundial, com o país devastado, os japoneses acreditavam que a estatística foi a arma fundamental utilizada pelos aliados para ganhar a guerra. Em 1950 Deming, foi ao Japão ensinar estatística e os métodos americanos de qualidade e ao longo dos anos, promoveu o uso do ciclo PDCA (planejar-fazer-chechar-agir) de melhoria contínua.

✓ Em 1954, devido às dificuldades da aplicação das teorias estatísticas e do controle pelas empresas, Juran estudioso Americano, foi convidado a ir ao Japão para levar os princípios da qualidade, integrando as iniciativas em todas as camadas da organização.

✓ Em meados de 1960, Kaoru Ishikawa foi um entusiasta do círculo do controle de qualidade, desenvolvendo uma estratégia de qualidade para o Japão. Suas principais contribuições foram os setes instrumentos do controle de qualidade: gráfico de Pareto, diagrama de causa e efeito, histogramas, folhas de verificação, gráficos de dispersão, fluxogramas e cartas de Controle.

✓ As primeiras iniciativas *Seis Sigma* nasceram nos anos 80, com o objetivo de capacitar a Motorola a enfrentar seus concorrentes, que fabricavam produtos com maior qualidade e preços menores.

✓ Em meados dos anos 90, a *Allied Signal* e a *General Electric* comprovaram o poder do *Seis Sigma* através da implantação de um programa corporativo, transformando o enfoque da melhoria da qualidade em melhoria dos negócios, obtendo resultados inacreditáveis em termos de ganhos financeiros.

✓ No final dos anos 90, o *Seis Sigma* deixou de ter foco apenas na indústria e produção e tornou-se um dos métodos mais poderosos que conduzem a melhoria contínua.

Womack (1993) cita que para que o L.S.S pudesse ser um grande sucesso nas organizações, o *Seis Sigma* foi atrelado ao *Lean Manufacturing*, desta forma foi unificado o método quantitativo (*Seis Sigma*) com o qualitativo (*Lean Manufacturing*). O sistema *Lean*, relatava basicamente a evolução da indústria automobilística, comparando o mercado japonês, europeu, e americano, descrevendo conceitos e métodos de trabalhos aplicados ao Sistema Toyota de Produção e benefícios da gestão integrada e redução de desperdícios, sendo que para que tenha sucesso necessário estar atrelado à algumas premissas:

✓ As primeiras iniciativas *Seis Sigma* nasceram nos anos 80, com o objetivo de capacitar a Motorola a enfrentar seus concorrentes, que fabricavam produtos com maior qualidade e preços menores.

✓ A maioria dos problemas exige apenas habilidade analítica básica.

✓ Se os problemas são vistos como fracassos, serão ocultados e não serão abordados.

✓ O inverso é uma oportunidade, então todo problema é uma oportunidade de melhoria.

✓ A melhoria é um processo cíclico de conquista de estabilidade, padronização de práticas e contínua pressão sobre o processo a fim de expor, os obstáculos.

Tendo como base as prerrogativas de que desperdícios de qualquer ordem e magnitude devem ser reduzidos, o *Lean Manufacturing* inseriu uma palavra conhecida em japonês como *Muda* que em português significa (lixo), significando a eliminação ou redução de quaisquer atividades que não agregam valor, esquematizado pela Figura 2.14.



Figura 2.14- Desperdícios no *Lean Manufacturing*. (Voitto, 2018).

Pode-se resumir estes oito desperdícios conforme descrição abaixo:

✓ *Muda* de defeitos e retrabalhos: Significa produtos fora da especificação, não conformidade, em que toda correção adicional é devido a um resultado não esperado, sendo fácil relacionar esse desperdício ao aumento de custos, horas extras e gastos adicionais.

✓ *Muda* de excesso de produção: Produção sem demanda dos clientes, excesso de produtos e produção por antecipação. Isto pode resultar em altos estoques do produto acabado.

✓ *Muda* de processamento impróprio: Utiliza-se do uso excessivo de recursos e pessoas, gerando atividades no processo além do necessário.

✓ *Muda* de transportes Desnecessários: O transporte é visto como um desperdício, pois não agrega valor ao produto, já que é um mal necessário de deve ser minimizado.

✓ *Muda* de movimentos desnecessários: Significa a movimentação desnecessária de equipamentos ou pessoas que não agrega valor ao produto.

✓ *Muda* de estoque: Podem ser considerados como produtos e materiais estocados sem necessidade, o que significa dinheiro parado.

✓ *Muda* de espera: Relaciona o tempo gasto desnecessariamente devido a atrasos ou operações não balanceadas.

✓ *Muda* de pessoas: Não valorização da mão de obra em sua capacidade intelectual, conhecimento sobre o negócio e geração de ideias.

### 2.2.2 Metodologia DMAIC

A metodologia *Lean Seis Sigma* LSS é focada em processos com passos quantitativos, estruturada, disciplinada e focada na melhoria do processo já existente com pouco ou nenhum investimento. Como base de sua estrutura é baseada no método DMAIC e ferramentas estatísticas. A letra *D* significa definição, em que se define o escopo do projeto com precisão, identificando o processo gerador do problema, definindo uma meta global e elaboração do contrato do projeto. A letra *M* significa medição, em que se realizam quantitativamente os dados coletados, avaliando as causas potenciais no processo mapeado e definindo os focos do projeto. A letra *A* significa identificar as causas raiz do problema com fatos e dados comprovando-os. A letra *I* significa *improve* (melhoria/ação) são propostas soluções, avaliando-se o risco de implementação, elaborando e executando o plano de ação definido. A letra *C* significa controle, na qual são medidos os resultados e definidos os mecanismos que garantam a sustentabilidade das melhorias executadas e alcançadas. A Figura 2.15 resume a metodologia DMAIC.

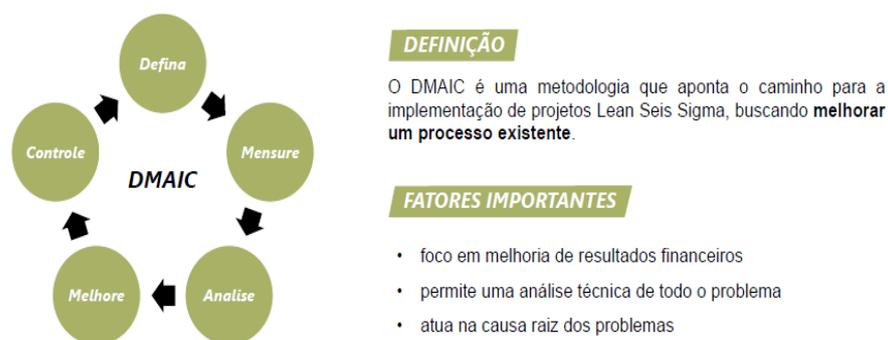


Figura 2.15- Definição método DMAIC. (Voitto, 2016)

### 2.2.3 Definição

O principal objetivo desta fase é definir claramente o escopo do projeto, avaliando o histórico sempre que possível, o processo em que ocorre e acordo dos principais pontos através do contrato de projeto (*Project charter*). Alguma das

principais ferramentas utilizadas são:

- ✓ Mapa de raciocínio: documento que possui a finalidade de registrar a forma de raciocínio do projeto. Deve conter o escopo, meta global e o contrato do projeto, principais causas problema e quais ações da melhoria e ferramentas qualitativas e quantitativas na análise dos dados do projeto.

- ✓ Voz do cliente: descreve as necessidades do cliente interno e externo e suas percepções sobre o produto ou serviço entregue a ele. Em geral essa ferramenta ajuda a identificar características críticas do processo, produto ou serviço e identifica uma métrica das características definidas pelo cliente, para orientar e focar o projeto.

- ✓ SIPOC: diagrama que tem como finalidade definir o principal processo envolvido no projeto de forma macro, e facilitar a visualização do escopo do trabalho.

- ✓ Contrato do projeto (*Project charter*): Documento que firma um acordo entre a equipe executora do projeto, o realizador do projeto, os gestores da empresa, com alguns objetivos como: apresentação clara dos objetivos esperados pela equipe, manter a equipe alinhada sobre os objetivos do projeto, formalização das principais definições do início do projeto como cronograma, escopo e meta e garantia do comprometimento dos envolvidos.

O tempo estimado para essa fase do projeto é estimado em uma a duas semanas. A Figura 2.16 traz um fluxograma desta fase da metodologia, onde o passo a passo do fluxo é válido para maior assertividade da escolha do projeto.

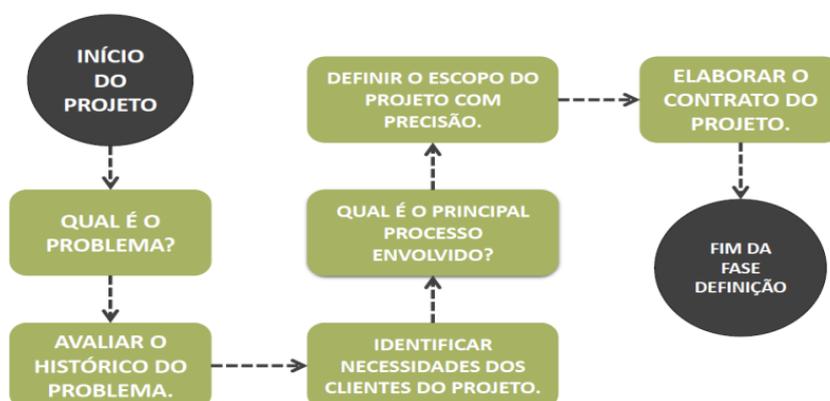


Figura 2.16- Fluxo de definição da metodologia DMAIC. (Voitto, 2019).

#### 2.2.4 Medição

O principal objetivo desta fase é analisar o fenômeno, conhecer o estado atual do processo, levantar as causas potenciais do problema e analisar quantitativamente a base de dados. As principais ferramentas que podem ser utilizadas são:

- ✓ Mapa de processo: ilustração gráfica do processo, este deve documentar como realmente o processo opera, incluindo as etapas que agregam e não agregam valor

- ✓ Espinha de peixe: também conhecida como diagrama de Ishikawa ou diagrama de causa e efeito, que proporciona análise de causas para um determinado efeito. As categorias podem ser variadas, porém comumente mais utilizadas: material, mão de obra, meio ambiente, máquina, medida e método.

- ✓ Matriz de causa e efeito: utilizada para priorizar as entradas do processo (causas X's) de acordo com o impacto que provoca em uma das saídas (Y's) ou requerimentos do cliente

- ✓ Matriz de esforço e impacto: Pode ser complementada pela matriz de esforço x impacto, no qual será avaliado para cada entrada, quais aquelas em que: será válido começar a tomar as ações para reduzir os defeitos no processo; se deverá coletar dados para fazer as análises adequadas; necessidade de empreender recursos (tempo, dinheiro, pessoas) para estudar a causa. O impacto de alto ou baixo é definido pela pontuação obtida na matriz de causa e efeito. O esforço alto ou baixo corresponde á necessidade de coleta de dados, tempo para análise e esforço na implementação das mudanças.

- ✓ Amplitude móvel: diferença entre o maior e o menor valores de um conjunto de dados e se baseia somente nos valores extremos do conjunto de dados.

- ✓ Desvio padrão: variação média do processo em relação ao valor da média. Se o desvio padrão for alto, o processo possui muita variabilidade, mas se o desvio for baixo o processo apresenta pouca variabilidade.

- ✓ Histograma: Também conhecido como diagrama de distribuição de frequências, é a representação gráfica, em colunas, de um conjunto de dados previamente tabulado e dividido em classes uniformes. Ao dispor as informações, o

histograma permite a visualização dos valores centrais e a dispersão em torno dos valores centrais e a forma da distribuição.

✓ **Capabilidade do processo ou capacidade do processo:** É a habilidade de se gerar produtos dentro de uma faixa de especificação proveniente dos clientes internos e externos, ou seja, a capacidade do processo é avaliada por meio da comparação da faixa característica do processo com a faixa de especificação. Há de se observar que somente processos com distribuição aproximadamente normal e estável devem ter sua capacidade avaliada. A Tabela 2.5 ilustra os principais índices para o cálculo da capacidade do processo.

Tabela 2.5- Principais índices da capacidade/capabilidade do processo.  
(Voitto, 2019).

Índice	Descrição	Cálculo
<b>Cp</b>	Mede a capacidade de maneira simples, para processos centrados. Mede o potencial do processo	<b><math>Cp = (LSE - LIE) / 6\sigma</math></b> Sendo LSE e LIE os limites de especificação do processo (superior e inferior, respectivamente)
<b>Cps</b>	Diferença do centro da distribuição e a especificação superior	<b><math>Cps = (LSE - \mu) / 3\sigma</math></b>
<b>Cpi</b>	Diferença do centro da distribuição e a especificação inferior	<b><math>Cpi = (\mu - LIE) / 3\sigma</math></b>
<b>Cpk</b>	Mede a capacidade de processos que não estão centrados	<b><math>Cpk = \text{mín} \{Cps ; Cpi\}</math></b>

Sobre os valores de Cp e Cpk podemos concluir que:

- Se  $Cp=Cpk$ , o processo é exatamente centrado.
- Quando  $CpK \leq Cp$ , o processo está descentralizado para algum dos lados e quanto maior essa diferença mais descentralizada está o processo.
- Um processo vai ser tido como capaz quando 6 desvios padrão (99,74 %) ou mais do seu processo couberem entre os limites especificados ( $Cp$  e  $CpK \geq 1$ ), mesmo não estando perfeitamente centralizado.
- Na indústria em geral o valor exigido para Cp e CpK é  $\geq 1,33$ , conforme Figura 2.17.

Valor de Cp e Cpk	Análise
<b>Cp e Cpk &lt; 1</b>	O processo está em um índice inadequado, necessitando de inspeção 100%.
<b><math>1 \leq \text{Cp e Cpk} &lt; 1,33</math></b>	O processo está em um índice satisfatório, aplicando inspeção por amostragem.
<b>Cp e Cpk <math>\geq 1,33</math></b>	O processo está em um índice bastante satisfatório, não necessitando de inspeção.

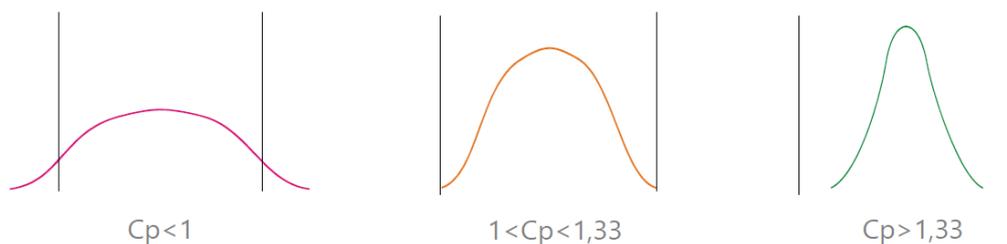


Figura 2.17-Avaliação dos valores de Cp e CpK no processo geral. (Adaptado Werkema, 2012).

Werkema (2012) sugere que o tempo estimado depende do projeto, e gira em torno de quatro a seis semanas. A Figura 2.18, representa o fluxo para a melhor adoção e sequenciamento da medição na metodologia.

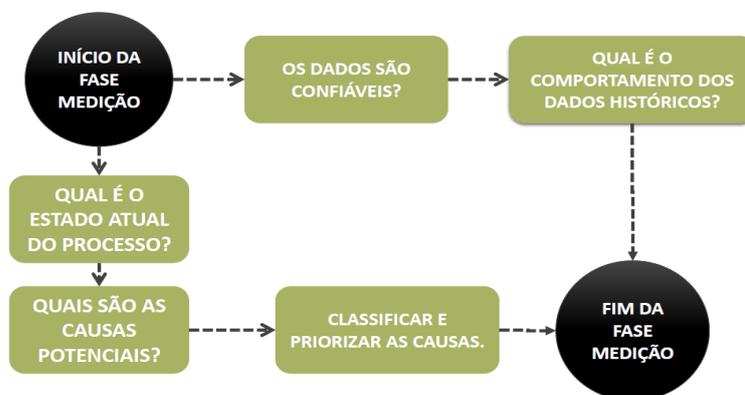


Figura 2.18- Fluxo de medição da metodologia DMAIC. (Voitto, 2019).

### 2.2.5 Análise

O principal objetivo desta fase é identificar as causas raízes (X) que afetam o processo de forma significativa e geram variabilidade no resultado de interesse (variável Y). Há se serem comprovados com fatos e dados, utilizando gráficos,

análise estatística e ferramentas qualitativas (análise de risco). Pode ser feitas perguntas de orientação, tais como:

✓ Amplitude móvel: diferença entre o maior e o menor valores de um conjunto de dados e se baseia somente nos valores extremos do conjunto de dados.

✓ Quais variáveis prioritárias que devemos atacar para melhorar o resultado de interesse?

✓ Quais são as causas raízes que podemos identificar e comprovar com os gráficos básicos?

✓ Quais são as causas raízes que podemos identificar e comprovar com a análise estatística?

✓ Quais são as causas raízes que podemos identificar através de uma análise de risco?

As principais ferramentas que podem ser utilizadas nesta fase são:

✓ *FMEA*: O *FMEA (Failure Mode and Effect Analysis)*, é conhecido como análise de modos de falhas e seus efeitos, é uma ferramenta que tem como objetivo identificar, hierarquizar e prevenir as falhas em potencial de um produto ou processo, ajudando ao aumento da confiabilidade e facilitando a rastreabilidade das ações necessárias para a mitigação do risco.

✓ Regressão linear simples: Técnica estatística para modelar e investigar a relação entre duas variáveis, explicando desta forma a dependência entre a variável de entrada (X) e a variável de saída (Y), ou seja é considerado um único regressor ou preditor e uma variável dependente ou variável de resposta Y, sendo geralmente dado pela equação (2.11).

$$Y = b_0 + b_1 x \quad (2.11)$$

Em que:

- Variável x: variável independente ou preditora.
- Variável y: variável dependente ou variável resposta.
- Parâmetro  $b_0$ : coeficiente linear ou intercepto.
- Parâmetro  $b_1$ : coeficiente angular ou inclinação da reta.

✓ Testes de hipóteses: Baseado na utilização de uma amostra aleatória extraída de uma população de interesse, com o objetivo de testar uma afirmação sobre um

parâmetro ou característica desta população. Não é tratado por uma simples comparação matemática entre dois ou mais valores, mas da necessidade de compreender se o valor obtido a partir de uma determinada amostra representa uma simples variação amostral da situação atual ou não.

Werkema (2012) sugere que o tempo estimado para esta fase do projeto é de 2 a 4 semanas. A Figura 2.19 exemplifica uma visão da fase de análise para melhor escolha e adoção das causas a serem estudadas.



Figura 2.19- Fluxo de análise da metodologia DMAIC. (Voitto, 2019).

### 2.2.6 *Improve*/ação

O principal objetivo desta fase é propor, testar e executar as soluções para o problema. Para cada causa raiz estudada e comprovada na fase de análise, será idêntica uma solução adequada que será implementada através de um plano de ação. Geralmente tem um tempo estimado de quatro a seis semanas a depender do projeto realizado. Além disso, será iniciada a verificação do impacto e os resultados obtidos com as melhorias implementadas. Os principais questionamentos que devem ser feitos são:

- ✓ Quais as possíveis ações de melhoria?
- ✓ Todas as melhorias propostas podem ser transformadas em soluções com elevado potencial de implementação?
- ✓ Como testar as soluções escolhidas a fim de garantir o alcance da meta sem efeitos colaterais indesejáveis?
- ✓ Como medir os resultados financeiros e no processo assim que o plano de ação for implementado?

As principais ferramentas para esta fase são:

✓ *DOE*: O *DOE* (*Design of experiments*) ou planejamento de experimentos traduzido para o português, é uma ferramenta utilizado para determinar quais variáveis independentes (variáveis x) tem maior influência sobre uma determinada variável de resposta.

✓ Diagrama de árvore: É uma ferramenta utilizada para o mapeamento detalhado dos caminhos (meios e medidas) a serem percorridos para se atingir a um objetivo. Para cada causa raiz na fase de melhoria, deve-se pensar em possíveis soluções que serão priorizados, testados se necessário e levados para o plano de ação.

✓ Matriz de priorização: Na fase de melhoria há geralmente muitas ideias de melhoria, no qual pode refletir em um plano de ação de difícil execução dentro do tempo previsto no projeto. Logo há a necessidade de uma ferramenta que possa ajudar a identificar quais ideias de melhoria são viáveis para o projeto e de fato geram impacto positivo no resultado de interesse. Essa ferramenta ajuda na identificação de quais ideias de melhoria serão levadas adiante no projeto. Se utiliza de *scores*, para fazer a correlação entre as soluções propostas e critérios de priorização, sendo os critérios mais utilizados na matriz de priorização: baixo custo, facilidade, rapidez, impacto sobre a causa raiz e a baixa probabilidade de gerar efeitos colaterais indesejados.

✓ Plano de ação/(*5W2H*): Ferramenta que utiliza em desdobramentos e informações mais tangíveis. Se utiliza geralmente das seguintes informações: O que será feito (*What*); Quando será feito (*When*); Onde será feito (*Where*); Quem fará (*Who*); Por que será feito (*Why*); Como será feito (*How*); Qual impacto financeiro, quantidade ou valor numérico (*How much*).

✓ 5 S: Metodologia japonesa simples e de fácil entendimento, que visa aperfeiçoar o comportamento das pessoas. Envolve mudança de hábitos e atitudes, melhorando o ambiente de trabalho e a qualidade de vida. Utiliza os seguintes princípios de: utilização (*seire*)/ descarte-ordenação (*seiton*); limpeza (*seisou*); saúde (*seiketsu*): autodisciplina (*shitsuke*).

✓ *Kaizen*: *Kaizen* termo oriundo da cultura japonesa que significa: *Kai* (mudança) e *Zen* (coisas boas melhores). É uma atitude de estar melhorando constantemente em essência continua com o PDCA e DMAIC, na qual deve fazer

parte da visão da empresa, em desafiar sempre seus processos com melhoria contínua o tempo que for preciso, mantendo na mentalidade dos colaboradores da empresa em todos os níveis. O *Kaizen* pode ser uma iniciativa independente nas empresas, promovendo ciclos de melhoria ao longo do ano, podendo ser utilizada dentro do Lean Seis Sigma.

✓ *SMED*: O *SMED* (*single minute exchange of dies*) é uma ferramenta do sistema Toyota de produção, que tem por objetivo reduzir o tempo de preparação ou setup ou seja troca rápida da ferramenta de trabalho, de equipamentos, minimizando períodos não produtivos e conseqüentemente aumentar a capacidade produtiva dos equipamentos.

A Figura 2.20 ilustra através de um fluxograma a rota para o processo de ação da metodologia DMAIC.

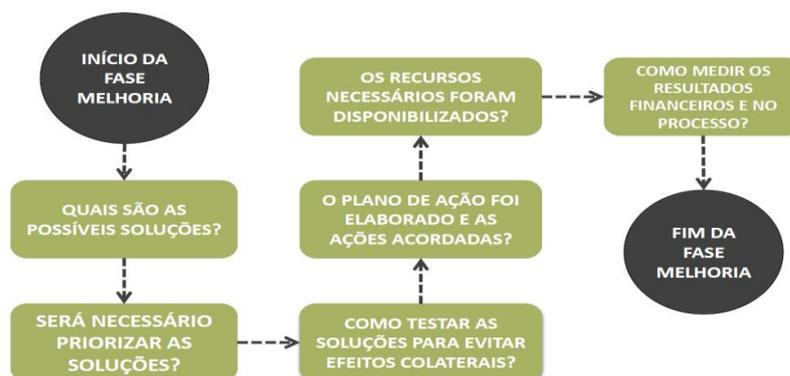


Figura 2.20- Fluxo de ação/melhoria referente a metodologia DMAIC. (Voitto, 2019).

### 2.2.7 Controle

O principal objetivo desta fase é monitorar os resultados alcançados após a implementação das melhorias, estabelecendo controles que garantam a sustentabilidade dos resultados, definindo o dono do processo e como será monitorado dia a dia. Essa fase é estimada em até quatro semanas pelas boas práticas, e faz uso de ferramentas, como por exemplo:

✓ Cartas de controle: Conjunto de pontos (amostras) ordenados no tempo, que são interpretados em função de linhas horizontais, chamadas de LSC (limite superior

de controle) e LIC (limite inferior de controle). As cartas de controle são elaboradas para dados com distribuição normal ou aproximadamente normal, em que pode ser observada o monitoramento da variabilidade e avaliação da estabilidade o processo, conforme Figura 2.21.

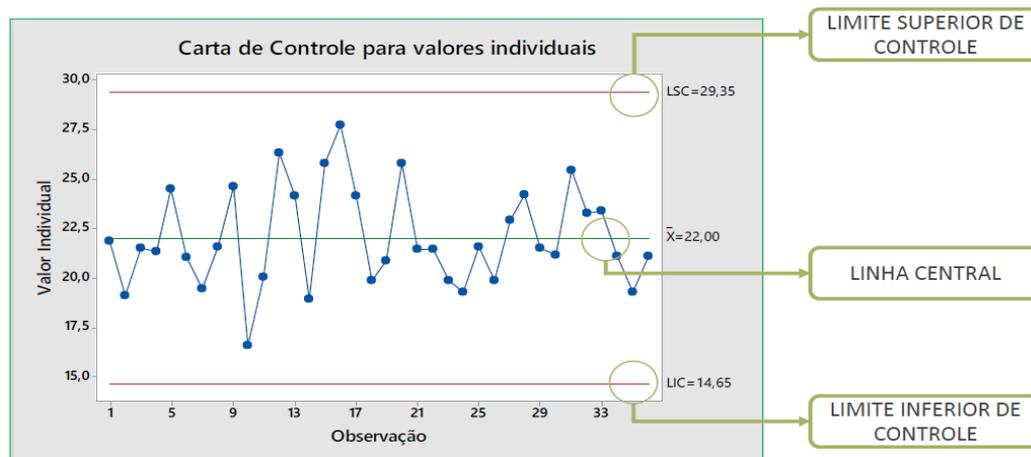


Figura 2.21- Modelo de carta de controle para valores individuais. (Voitto, 2019).

✓ Procedimento operacional padrão (POP): É a forma como a padronização é registrada. Seu objetivo é a utilização nas operações da empresa, facilitando a execução e o treinamento dos operadores.

✓ *Poka Yoke*: É um termo japonês que significa á prova de erros, e faz a detecção e corrige erros em um processo, antes que se transformem em defeitos, atacando a causa raiz do problema.

O fluxo para essa fase do projeto está demonstrado na Figura 2.22.

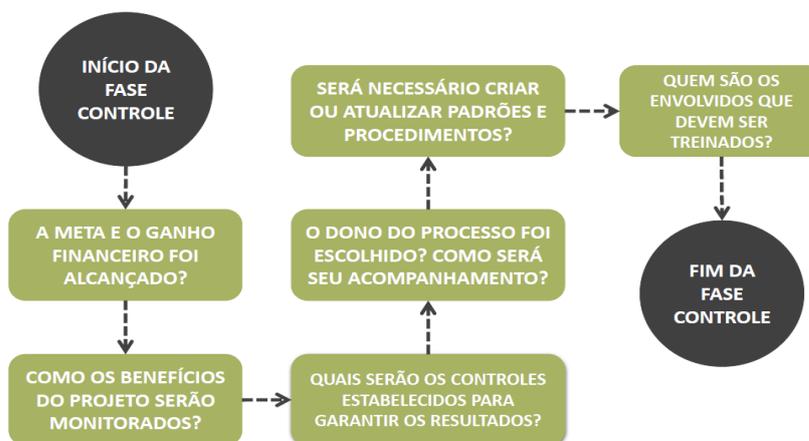


Figura 2.22- Fluxo de controle referente à metodologia DMAIC. (Voitto, 2019).

### 2.2.8 Escolha do Projeto Lean Seis Sigma (LSS)

Para uma boa assertividade do programa LSS a definição dos projetos é uma das atividades mais importantes do processo de implementação. Projetos bem selecionados conduzirão a resultados rápidos e significativos e, conseqüentemente, contribuirão para o sucesso e a consolidação da cultura *Lean Seis Sigma* na empresa. Por outro lado, projetos inadequados implicará ausência ou atraso de resultados e frustração de todos os envolvidos, o que poderá determinar o fracasso do programa na organização, saber o fluxograma do processo de seleção é vital para a continuidade e maturidade dos projetos, evitando que desperdícios da ordem do muda se tornem presentes. A Figura 2.24, mostra um fluxo esquemático para a continuidade ou não de projetos LSS. As principais características para identificar um bom projeto são:

- ✓ Tema do projeto deve ser relacionado com os objetivos estratégicos da empresa e ser trabalhado.
- ✓ Forte contribuição para o alcance das metas estratégicas da empresa.
- ✓ Grande colaboração para o aumento da satisfação dos clientes/consumidores.
- ✓ Chance elevada de conclusão dentro do prazo estabelecido.
- ✓ Grande impacto para a melhoria da performance da organização (ganho mínimo de 50% em qualidade, ganho financeiro mínimo relevante para o porte e tipo de negócio da empresa, desenvolvimento de novos produtos ou novos processos, por exemplo).
- ✓ Quantificação precisa, por meio do emprego de métricas apropriadas, dos resultados que devem ser alcançados no projeto.
- ✓ Possuir uma base de cálculos confiáveis e um indicador mensurável, sendo possível quantificar os resultados.
- ✓ Solução necessária para eliminar o problema que não seja conhecida ou não óbvias para a organização.
- ✓ Patrocínio por parte da alta administração da empresa e dos demais gestores envolvidos.

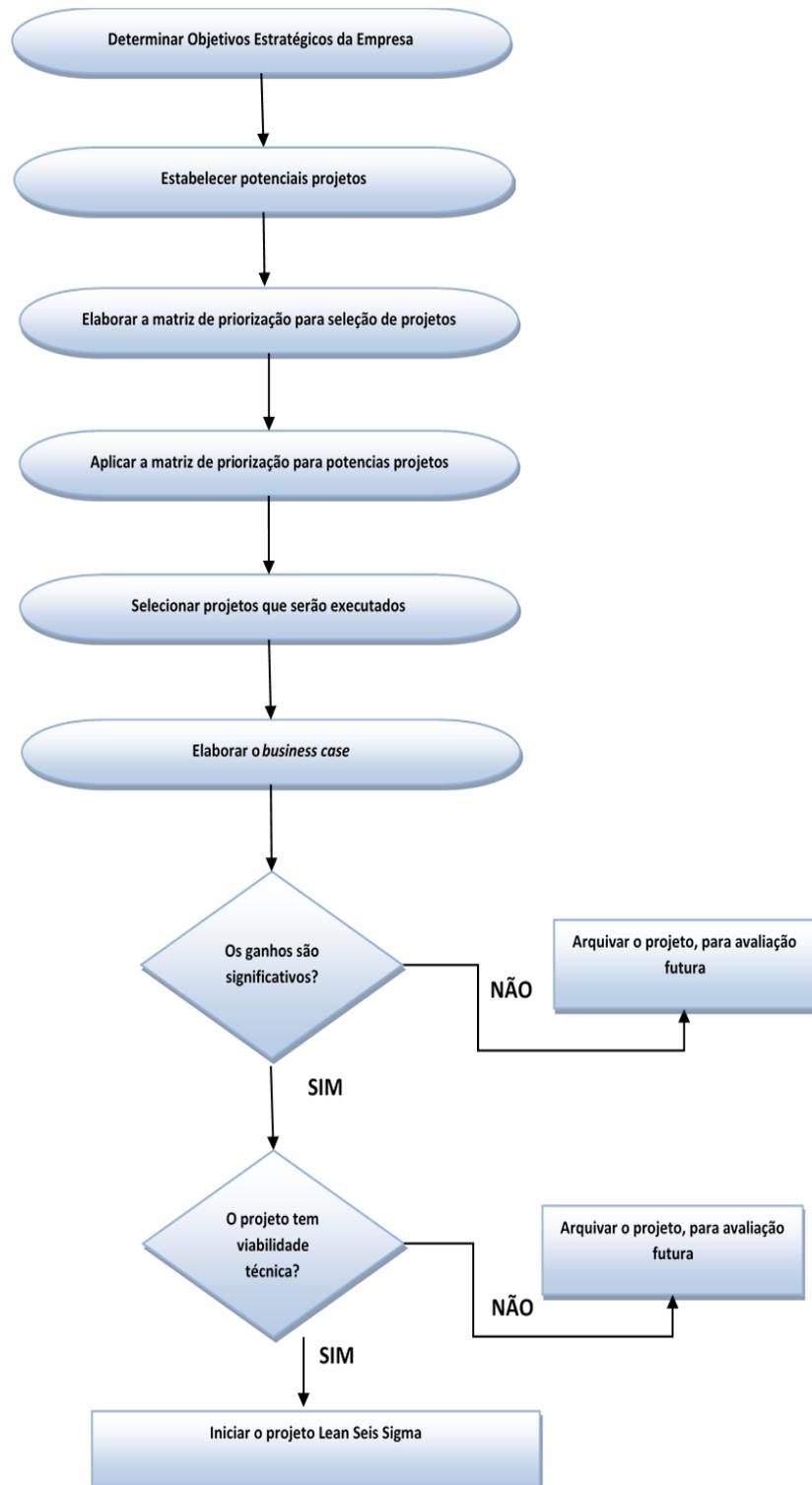


Figura 2.24- Fluxo para seleção de projetos LSS. (Adaptado de Werkema, 2012).

### 2.2.9 Aplicação da melhoria contínua em indústria de mineração

A mineração ocupa um lugar de destaque em diversas economias mundiais e no Brasil com seu grande potencial geológico não há de ser diferente. Segundo o IBRAM (2018) o PIB da indústria extrativa foi de 4,2 % até setembro de 2018, gerando 180 mil empregos diretos e mais de dois milhões de empregos indiretos, tornando a mineração um ponto chave para o crescimento nacional em diversas regiões brasileiras. A mineração vive por ciclos econômicos puxados geralmente por expansões e declínios de preços influenciados por guerras, crises econômicas, desastres naturais e oportunidades/crescimentos mundiais. Nesta oscilação que leva a variação de preços das commodities, as mineradoras precisam cada vez mais estabilizar as suas operações e melhorá-las, a fim de torná-las cada vez mais competitiva, gerando ganhos às partes interessadas (stakeholders), perenidade de suas operações e sustentabilidade de sua imagem perante o mercado.

Segundo (Werkema, 2012) a partir de 1988, quando a Motorola ganhou o Prêmio Nacional da Qualidade *Malcolm Baldrige*, o Seis Sigma tornou-se conhecido como o programa responsável pelo sucesso da organização. Com isso, outras empresas, como *Asea Brown Boveri*, *Allied Signal*, *General Electric*, *Kodak* e *Sony*, passaram a utilizar com sucesso o programa e a divulgação dos enormes ganhos alcançados por elas geraram um crescente interesse pelo Seis Sigma. Podemos dizer que o Seis Sigma foi celebrado pela GE, a partir da divulgação, feita com destaque pelo CEO Jack Welch, dos expressivos resultados financeiros obtidos pela empresa através da implantação da metodologia (por exemplo, ganhos de 1,5 bilhão de dólares em 1999).

Após a adoção pela GE, houve uma grande difusão do programa. No Brasil, o interesse pelo Seis Sigma também está crescendo a cada dia. Já há alguns anos, as empresas cujas unidades de negócio no exterior estavam implementando este programa o conhecem. A pioneira na implementação do Seis Sigma com tecnologia nacional foi a Whirlpool (Multibrás e Embraco), que, em 1999, obteve mais de 20 milhões de reais de retorno, a partir dos projetos *Seis Sigma*. Atualmente, várias outras empresas no Brasil estão adotando o programa com suporte de consultoria nacional.

Na mineração brasileira há de serem observados casos e boas práticas, relacionadas à melhoria contínua das suas operações (planta, mina, processo, apoio), sejam de maior e/ou menor grau. As vantagens competitivas procuradas por empresas dentro do setor mineiro podem ser atingidas por meio de inovações tecnológicas, melhoria na qualidade e garantia da entrega do produto, ou mesmo com reduções de custos pela reengenharia de processos.

O fomento por melhoria contínua em mineração está interligado diretamente ao atual cenário econômico (menos por mais), sendo intensificado pela inclusão e contribuição dos centros acadêmicos/universidades. Atualmente já existem congressos, eventos e revistas especializadas para este fim, como exemplo: Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto, *Workshop* Redução de Custos e Minas Subterrâneas. Através de pesquisas foram verificados trabalhos de melhoria contínua, em diversas áreas, demonstrando o tão versátil e importante a continuidade da inclusão deste pensamento enxuto em empresas de mineração descritos na Tabela 2.6. Nota-se também uma nova vertente nas empresas, que já trabalham com centros de excelência para melhoria contínua, ressaltando mais uma vez essa nova visão da mineração 4.0.

Tabela 2.6- Exemplos de melhoria contínua aplicada à mineração.  
(Contribuição do autor, 2020).

Casos de melhoria contínua aplicada a mineração				
Empresa	Setor	Proposta	Valor alcançado	Fonte
Usiminas S.A	Perfuração de rocha	Aumento da vida útil dos BIT'S utilizados nas perfuratrizes T4BH	R\$ 150.000/ano	<a href="https://revistaminerios.com.br/aumento-da-vida-util-dos-bits-de-perfuracao/">https://revistaminerios.com.br/aumento-da-vida-util-dos-bits-de-perfuracao/</a>
Kinross	Desmonte de rocha	Redução de 81 % na perda de furos na Mina dO Morro em Paracatu (MG)	R\$ 808.000/ano	<a href="https://revistaminerios.com.br/reducao-de-81-na-perda-de-furos-para-detonacao-na-mina/">https://revistaminerios.com.br/reducao-de-81-na-perda-de-furos-para-detonacao-na-mina/</a>
CSN	Carga e transporte	Utilização de inteligência artificial para aumento da produtividade de	R\$ 10.000.000/ano	<a href="https://revistaminerios.com.br/aumento-da-produtividade-de-carregamento/">https://revistaminerios.com.br/aumento-da-produtividade-de-carregamento/</a>
Samarco	Transporte	Redução do custo operacional com pneus	R\$ 1.230.756/ano	<a href="https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/9435/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O_MelhoriaCont%C3%ADnaAplicada.pdf">https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/9435/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O_MelhoriaCont%C3%ADnaAplicada.pdf</a>
Samarco	Britagem	Aumento da produção no transporte por correias transportadoras	R\$ 29379823/ano	<a href="https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/9435/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O_MelhoriaCont%C3%ADnaAplicada.pdf">https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/9435/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O_MelhoriaCont%C3%ADnaAplicada.pdf</a>
Anglo American	Perfuração de rocha	Redução de custos com ferramentas de perfuração	R\$ 3.600.000/ano	<a href="https://www.brasilmineral.com.br/noticias/redu%C3%A7%C3%A3o-de-custos-com-perfura%C3%A7%C3%A3o-no-minas-rio">https://www.brasilmineral.com.br/noticias/redu%C3%A7%C3%A3o-de-custos-com-perfura%C3%A7%C3%A3o-no-minas-rio</a>
Yamana Gold	Moagem	Redução do consumo específico de bolas na moagem	US\$ 143.156 (0,58 ano)	<a href="https://revistaminerios.com.br/reducao-de-consumo-especifico-de-bolas-na-moagem/">https://revistaminerios.com.br/reducao-de-consumo-especifico-de-bolas-na-moagem/</a>
Vale	Rejeito	Reaproveitamento do rejeito da flotação para reduzir consumo de água em Sossego	300.000 m³ de água na planta	<a href="https://revistaminerios.com.br/wp-content/uploads/2019/07/MM394_120_compressed.pdf">https://revistaminerios.com.br/wp-content/uploads/2019/07/MM394_120_compressed.pdf</a>
Kinross	Lixiviação	Adoção de recuperação gravimétrica antes da lixiviação do concentrado de ouro	US\$ 9.000.000,00	<a href="https://revistaminerios.com.br/wp-content/uploads/2019/07/MM394_120_compressed.pdf">https://revistaminerios.com.br/wp-content/uploads/2019/07/MM394_120_compressed.pdf</a>
MRN	Transporte	Menor tempo de manutenção de pneus na frota de produção equivale à compra de um caminhão	R\$ 959.600/ (0,167 ano)	<a href="https://revistaminerios.com.br/wp-content/uploads/2019/07/MM395_compressed.pdf">https://revistaminerios.com.br/wp-content/uploads/2019/07/MM395_compressed.pdf</a>
MRN	Lavra	Projetos de melhoria de produtividade geram redução de custo	R\$ 18.400,00 (ano)	<a href="https://revistaminerios.com.br/wp-content/uploads/2019/10/MM_400_ar te9_Ok.pdf">https://revistaminerios.com.br/wp-content/uploads/2019/10/MM_400_ar te9_Ok.pdf</a>
Rio Deserto	Peneiras	Proteção do eixo excêntrico das peneiras	R\$ 1.400.000,00/ano	<a href="https://revistaminerios.com.br/wp-content/uploads/2019/07/MM395_compressed.pdf">https://revistaminerios.com.br/wp-content/uploads/2019/07/MM395_compressed.pdf</a>
Rio Deserto	Lavra	Adaptação no suspiro do tanque previne perda de óleo da mineradora contínua	R\$ 120.236,80/ano	<a href="https://revistaminerios.com.br/wp-content/uploads/2019/07/MM395_compressed.pdf">https://revistaminerios.com.br/wp-content/uploads/2019/07/MM395_compressed.pdf</a>
ArcelorMittal	Segurança	Programa Mina Segura: O sucesso da gestão alinhada às boas práticas	87,13 % incidentes	<a href="https://revistaminerios.com.br/wp-content/uploads/2019/07/MM395_compressed.pdf">https://revistaminerios.com.br/wp-content/uploads/2019/07/MM395_compressed.pdf</a>
Kinross	Rejeito	Reprocessamento do rejeito aurífero eleva produção do metal	122.497 Oz	<a href="https://revistaminerios.com.br/wp-content/uploads/2019/07/MM395_compressed.pdf">https://revistaminerios.com.br/wp-content/uploads/2019/07/MM395_compressed.pdf</a>
Kinross	Sondagem	Otimização do processo produtivo de preparação de amostras de sondagem	US\$ 14,10 (por amostra)	<a href="https://revistaminerios.com.br/wp-content/uploads/2019/07/MM395_compressed.pdf">https://revistaminerios.com.br/wp-content/uploads/2019/07/MM395_compressed.pdf</a>
Yamana Gold	Perfuração de rocha	Menor hora parada por problemas de infraestrutura da frota da perfuração vertical		<a href="https://issuu.com/revistaoempreiteiro1/docs/mm_369_site">https://issuu.com/revistaoempreiteiro1/docs/mm_369_site</a>
LeaGold	Eluição	Melhorias no circuito de eluição	-R\$ 287.487	<a href="https://revistaminerios.com.br/wp-content/uploads/2019/07/MM395_compressed.pdf">https://revistaminerios.com.br/wp-content/uploads/2019/07/MM395_compressed.pdf</a>
Mineração Aipoena	Recuperação metalúrgica	Mudança no circuito de adoração para recuperação do ouro	R\$361.500/ano	<a href="https://revistaminerios.com.br/mudanca-no-circuito-de-adsorcao-eleva-a-recuperacao-de-ouro/">https://revistaminerios.com.br/mudanca-no-circuito-de-adsorcao-eleva-a-recuperacao-de-ouro/</a>
Vale	Desmonte de rocha	Fragcom busca alta performance de desmonte com redução de custos	Redução de 60 % de furos perdidos	<a href="http://www.vale.com/brasil/PT/initiatives/innovation/mais/Documents/vale_revista-mais_digital_por_fragcom.pdf">http://www.vale.com/brasil/PT/initiatives/innovation/mais/Documents/vale_revista-mais_digital_por_fragcom.pdf</a>

### 3.0 ESTUDO DE CASO

#### 3.1 Localização e Geologia

A mina está situada na região centro-leste do estado de Sergipe, no município de Rosário do Catete, distando 45 km da capital Aracaju, conforme Figura 3.1.

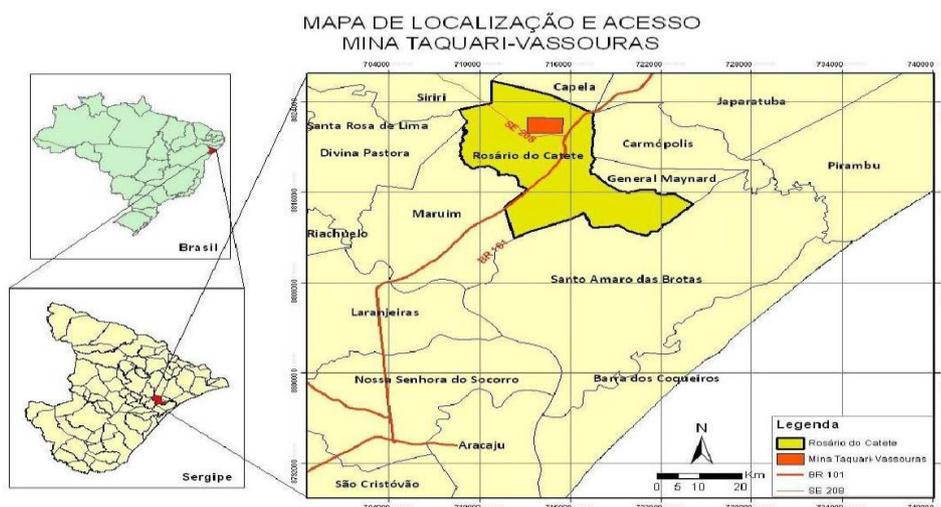


Figura 3.1- Mapa de localização e acesso da mina. (Passos, 2012).

A geologia local sub-bacia de Taquari-Vassouras apresenta uma área aproximada de 185 km<sup>2</sup> (Cerqueira et al. 1982), e situa-se entre os Altos de Carmópolis e Siririzinho, ambos locais produtores de petróleo e gás natural. O minério a ser extraído é a silvinita que são provenientes da lixiviação da carnalita pré-existente.

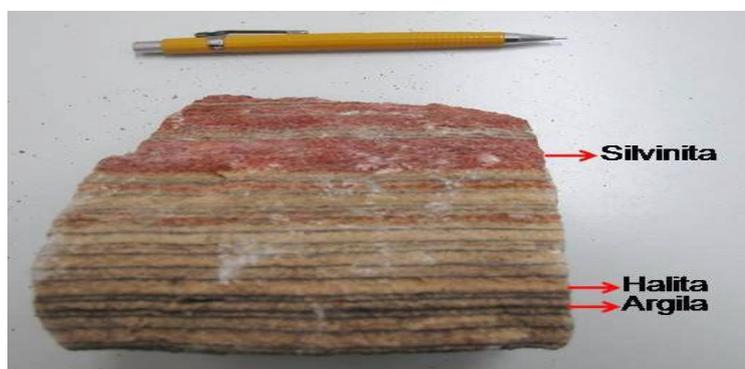


Figura 3.2- Composição litológica dos horizontes de correlação. (Passos, 2012).

As sub-bacias Taquari-Vassouras e Santa Rosa de Lima são destaques pelo grande potencial econômico que apresentam, principalmente quanto à ocorrência de sais de potássio e magnésio. Estes depósitos evaporíticos pertencem ao Membro Ibura da Formação Muribeca, com ocorrência restrita à subsuperfície e formados no Neo-Aptiano, na fase transicional da bacia Sergipe-Alagoas.

### 3.2 Operação de Mina

A mina tem sua operação realizado por lavra subterrânea, sendo o método de extração realizado por câmaras e pilares (*room and pillar*), com pilares retangulares geralmente de 30,0 x 35,0 m, com taxa de extração média em 40 %. A profundidade vertical máxima atual é de aproximada de 650 metros, e a extensão de lavra em painéis desativados é de até 7,3 Km em relação ao ponto zero da mina-PO (poço II para içamento de pessoas e equipamentos). A operação de lavra é realizada por seis painéis de lavra, utilizando o minerador contínuo (minerador Marieta), *shuttle car* (onde é realizada o transporte do material desmontado), e *feeder brake* (quebrador primário do material desmontado).

O transporte do minério e estéril é feito por correias transportadoras, até um estocador de material (silo) e seu içamento realizado através de um poço. A operação de lavra não faz uso de explosivos para essa atividade (lavra), os explosivos são apenas utilizados para atividades atreladas ao abatimento de rocha. A Figura 3.3 esquematiza a operação de lavra.

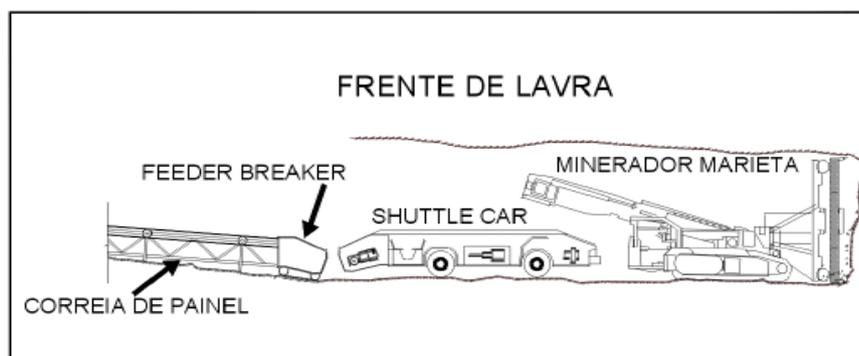


Figura 3.3- Lavra com minerador contínuo. (Arquivos internos, 2012).

A tonelage desmontada em cada painel varia de acordo com o número de

cortes que equivale a altura (m) e passes equivalente ao comprimento (m), escavados dado pelo modelo rotular do minerador contínuo. Os painéis de lavra têm altura variável entre 2,7 e 10,3 m, e largura máxima de 7,90 metros. A operação é realizada de forma ininterrupta durante o ano, com escala de 6 horas por turno, excluindo as trocas as paradas operacionais planejadas (troca de turno, deslocamento, inspeção de frentes, abastecimento etc.). A frota de equipamentos nas operações de apoio e produção é descrita na Tabela 3.1.

Tabela 3.1- Frota de equipamentos da mina. (Contribuição do autor, 2020).

<b>Frota de equipamentos</b>		
<b>Equipamento</b>	<b>Área</b>	<b>Quantidade</b>
Marieta	Produção	6
<i>Shuttle car</i>	Produção	14
<i>Feeder breaker</i>	Produção	5
Plataforma elevatória	Apoio	6
<i>LHD</i>	Apoio	9
<i>Scaller</i>	Apoio	1
<i>Brokk</i>	Apoio	2
<i>Bobcat</i>	Apoio	2
Caminhonetes	Apoio	33
Compressor de ar	Apoio	14
Lubrificador	Apoio	2

### 3.3 Circuito de refrigeração e ventilação de mina

A mina dispõe de sistema de ventilação e refrigeração, que são formados por poços, ventiladores e câmaras de refrigeração, com o objetivo de atendimento à demanda de ar e temperatura do ambiente de trabalho, tendo como premissas a diluição dos gases provenientes da combustão de equipamentos diesel, utilizados no apoio das atividades, manutenção da qualidade do ar e do atendimento às questões termodinâmicas provenientes do grau geotérmico. A entrada de ar fresco e saída de ar contaminado proveniente das frentes de lavra, são realizadas por dois poços

distintos, possuindo para ambos uma profundidade média de 430 metros. O poço que serve para exaustão das frentes de serviços é o mesmo utilizado para içamento do minério proveniente da mina. A distribuição do ar fresco segue para três áreas da mina (norte, sul, nordeste), e possuem regulagens para melhor direcionamento do fluxo de ar às frentes de serviço como: portas metálicas, cortinas, pontes, reguladores, muros de concreto, entre outros.

A planta de superfície possui seis máquinas de refrigeração sendo estas: três máquinas de amônia *frick* que trabalham em paralelo e três máquinas de refrigeração R134A que também funcionam em paralelo. Atualmente existem duas máquinas de refrigeração R134a trabalhando em série com duas máquinas *frick* de amônia, como mostra Figura 3.4.

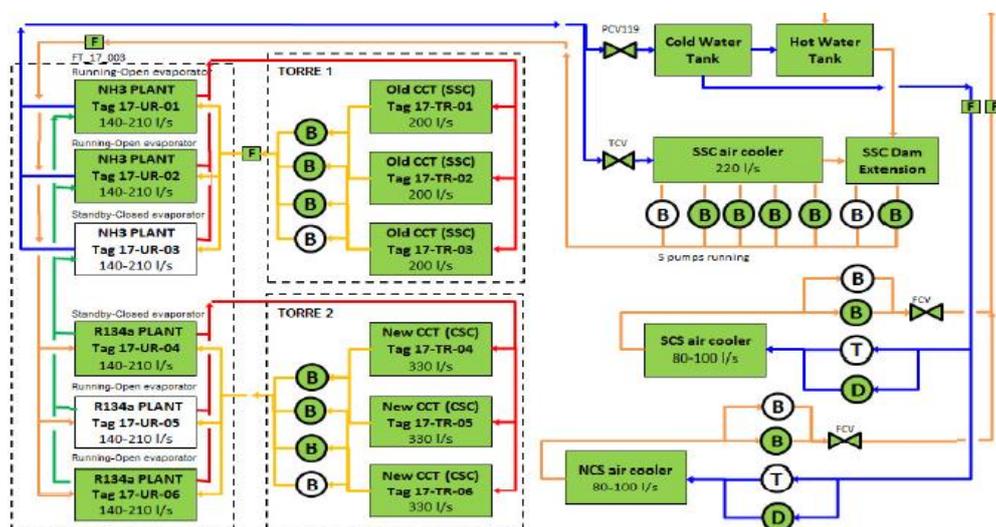


Figura 3.4- Casa de refrigeração da mina subterrânea. (Arquivos internos, 2012).

A mina possui câmaras de pulverização e ventiladores principais. Na superfície há a planta de refrigeração, e no subsolo há 3 ventiladores principais. Dois destes ventiladores principais estão localizadas na área central (Neus e CSC) e outro ventilador principal na área norte da mina. A Figura 3.5, ilustra dois destes ventiladores na mina denominados Neus e CSC.

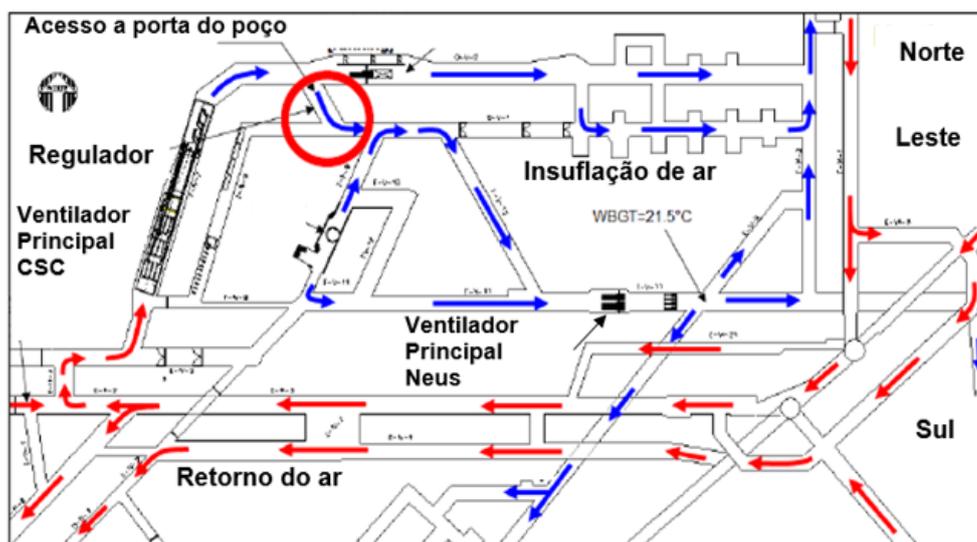


Figura 3.5- Desenho do circuito de ventilação principal da mina. (Arquivos internos, 2018).

A Tabela 3.2 demonstra as características do sistema principal de refrigeração e ventilação da mina, excluindo a câmara de vento da superfície (SSC), constatando uma vazão de ar da mina em  $465 \text{ Kg/m}^3$ , ou  $532 \text{ Kg/s}$  para fluxo de ar considerando a variação da densidade do ar ( $\text{Kg/m}^3$ ).

Tabela 3.2- Características do sistema de ventilação principal. (Contribuição do autor, 2020).

Localização	Vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Densidade do ar ( $\text{Kg/m}^3$ )	Fluxo de ar ( $\text{Kg/s}$ )	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )
CSC	117	1,118	130,81	21,6 a 22,2
NEUS	235	1,117	262,50	20,0 a 22,0
NSC	113	1,227	138,65	19,4 a 20,3
<b>Total</b>	<b>465</b>		<b>531,95</b>	

A ventilação secundária consiste em ventiladores e exaustores secundários com uso de dutos com comprimento variando de 10 ou 15 metros, localizados nas seis frentes de lavra e/ou em locais de exploração/sondagem.

A Figura 3.6 demonstra de forma simples, o circuito de ventilação secundária

das frentes de lavra. Há em todas as frentes de lavra, um ventilador localizado próximo ao minerador contínuo que faz a exaustão de cerca de  $34 \text{ m}^3/\text{s}$  de ar da frente de lavra, e um ventilador de  $15 \text{ m}^3/\text{s}$  insuflando ar oriundo da galeria principal para a posição em que o operador do minerador contínuo esteja trabalhando.

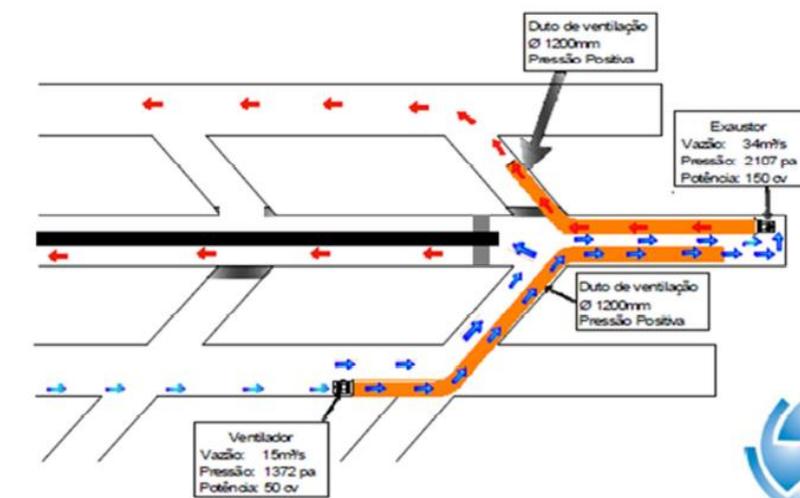


Figura 3.6- Modelo de ventilação secundária adotado na mina. (Arquivos internos, 2014).

### 3.4 Planejamento de produção e produto beneficiado

O plano de aproveitamento econômico da mina (PAE) considera a continuidade da vida útil da mina até 2026. Campanhas de sondagens são realizadas para ativa descoberta e aumento das reservas inferidas. A Figura 3.7 indica a produção da mina (t) dos últimos cinco anos no período de (2015 a 2019) acumulado de 11.023.561 t de material desmontado, em que é comprovado queda da produção em 2019 em relação ao penúltimo ano 2018 de - 15,5 %.

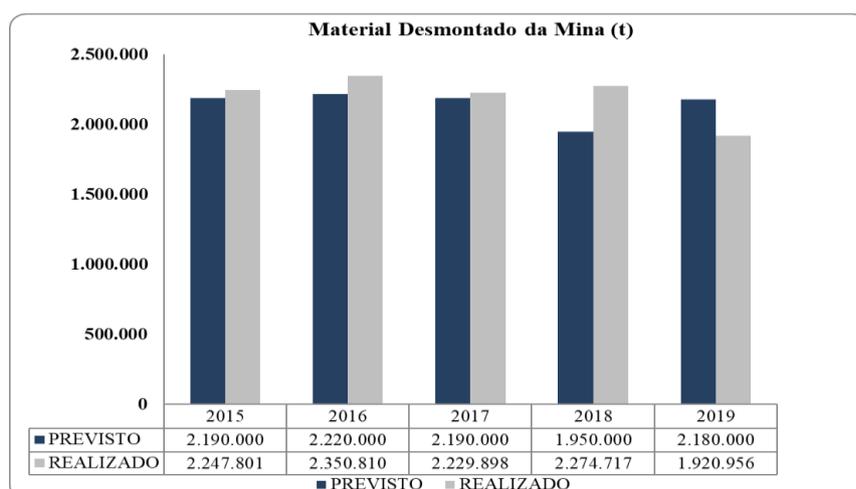


Figura 3.7- Produção durante o período de 2015 a 2019. (Contribuição do autor, 2020).

O produto para venda é o cloreto de potássio (KCl), sendo produzidas basicamente três tipos de produtos após a lavra e beneficiamento (granulado, standard, *pink*). As características químicas do produto ( $K_2O$ ) ha de serem sempre superiores a 58 % para recuperação e venda. No período de 2015 a 2019 o produto (KCl) produzido foi de 2.396.787 t, acarretando redução de 15,3 % do período de 2018 para 2019. A queda não esteve na mesma correlação da produção, em virtude do teor médio alimentado superior à média do período (2015 a 2018). A produção de KCl é vendida para mercado interno, representando cerca de 8,0 % do produto no Brasil (Anuário DNPM, 2018).

### 3.5 Identificação do problema

O ponto para a escolha de um trabalho de melhoria contínua, consiste na análise de situações em perdas produtivas (t), elevado custo unitário, segurança operacional e problemas ambientais, que afetam os indicadores propostos e planejados da empresa. A melhoria persistirá em analisar qualitativamente e quantitativamente as oportunidades/gargalos, procurando soluções ágeis, baixo esforço e alto impacto no que se refere aos resultados. No estudo, os problemas são verificados sob o olhar de dois grandes indicadores de performance de desempenho (KPI): produção (t) e custos (R\$).

O termo *KPI* vem do inglês *Key Performance Indicator* (indicador chave de desempenho). Estes *KPI's* são indicadores utilizados para medir o desempenho das atividades e processos, permitindo o acompanhamento sistemático de metas estabelecidas. A maior vantagem do uso de indicadores é transformar números avulsos em conhecimento sobre o negócio. Com esses dados, se conseguem fazer previsões e identificar problemas no andamento das atividades, possibilitando fazer ajustes na estratégia caso seja necessário. Em outras palavras, os *KPI's* oferecem um diagnóstico preciso da organização, o que torna os erros no planejamento cada vez menos frequentes.

Tendo como base o indicador de produção (t), será analisada a performance da produção nos meses de janeiro a dezembro de 2019, para verificação de quais indicadores tiveram maior impacto na lavra, conforme descrição da Tabela 3.3.

Tabela 3.3- Indicadores de performance em 2019. (Contribuição do autor, 2020).

<b>Produção 2019 (t)</b>				
<b>Painel</b>	<b>Área</b>	<b>Realizado</b>	<b>Planejado</b>	<b>Varição</b>
1	NE	302.963	401.679	-98.716
2	NE	317.213	408.882	-91.669
3	t	240.442	280.783	-40.341
4	t	218.844	229.403	-10.559
5	t	191.844	195.801	-3.957
6	t	311.026	333.770	-22.744
7	t	35.855	32.841	3.014
8	t	17.585	22.709	-5.124
9	t	13.177	21.491	-8.314
10	t	86.911	74.375	12.536
11	t	184.796	174.754	10.042
<b>Total</b>	t	<b>1.920.656</b>	<b>2.176.488</b>	<b>-255.832</b>

<b>Indicadores de Performance</b>				
Utilização	%	26,4	31,5	<b>-5,1</b>
Disp. Física	%	72,7	73,0	<b>-0,3</b>
Produt.	t/h	167,4	174,2	<b>-6,8</b>
O.E.E	%	18,5	23,0	<b>-4,5</b>

Em 2019 as perdas produtivas (t) foram de 255.832 t de material desmontado na mina, em que representando as perdas por indicadores (utilização, produtividade e disponibilidade física), verifica-se que os maiores desvios correlacionados com a produção foram: utilização (79 %), produtividade (19 %) e disponibilidade física (2 %), demonstrado na Figura 3.8.

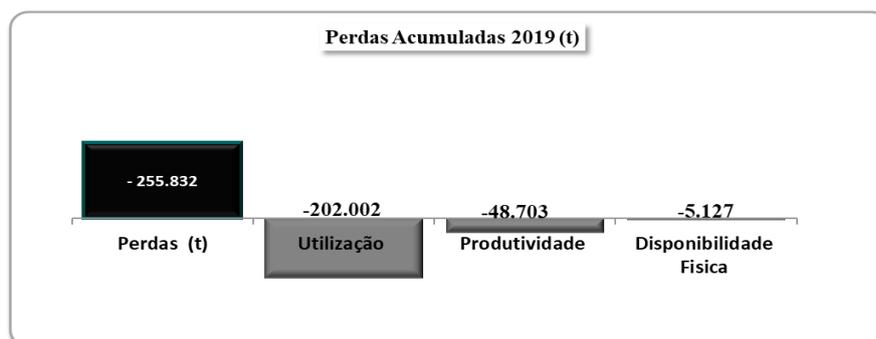


Figura 3.8- Perdas acumuladas por indicador em 2019. (Contribuição do autor, 2019).

O O.E.E (%) (*overall equipment effectiveness*) significa eficiência geral do processo é um indicador utilizado para medir a eficiência global de um processo/equipamento. A O.E.E (%) é representada pela equação 3.1 que traduz a real eficiência combinada da utilização (%), disponibilidade física (%) e produtividade (%).

$$O.E.E (\%) = (D.F) * (Produt.) * (Util) \quad (3.1)$$

Sendo:

✓ Disponibilidade Física (D.F %) = Relação entre a diferença do número total de horas de um período (horas calendário) e o número de horas de manutenção (preventiva, corretiva, oportunidade e outras), com o número total de horas do período considerado.

✓ Utilização (Util. %) = É a relação entre o tempo em que um ou mais ativos efetivamente utilizados pela operação e o total de horas disponibilizados pela manutenção para esses ativos.

✓ Produtividade (Prod. %) = Volume do produto gerado, processado ou transportado por um ativo ou unidade em um período.

O.E.E % é o indicador que contempla a utilização, produtividade e disponibilidade física, sendo, portanto, o de maior relevância para a operação de mina e controle de produção. Desta forma foi verificado se o O.E.E % é correlacionado com a produção (t) executada da mina em 2019, evidenciado pela Figura 3.9.

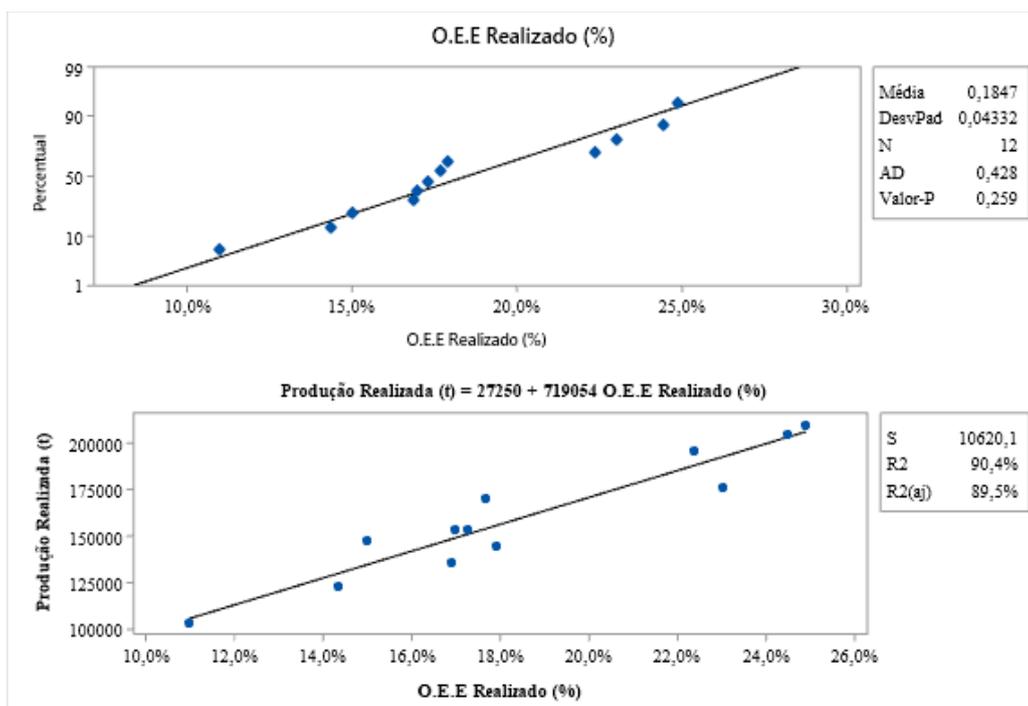


Figura 3.9- Correlação de indicadores de performance. (Contribuição do Autor, 2019).

Para verificar se há correlação deve-se buscar o coeficiente de correlação ( $R^2$ ). O  $R^2$  é uma medida estatística de quão próximos os dados estão da linha de regressão ajustada. Ele também é conhecido como o coeficiente de determinação ou o coeficiente de determinação múltipla para a regressão múltipla. A definição do R-quadrado é a porcentagem da variação da variável resposta que é explicada por um modelo linear. O R-quadrado está sempre entre 0 e 100%, para a Figura 3.9 o  $R^2$  foi de 90,4% e o  $R^2$  ajustado (aj) de 89,5%, sendo a análise feita da seguinte forma:

- ✓ 0% indica que o modelo não explica nada da variabilidade dos dados de resposta ao redor de sua média.
- ✓ 100% indica que o modelo explica toda a variabilidade dos dados de resposta ao redor de sua média.

Tendo a informação da Figura 3.9, será verificado se a produção (t) em função do indicador (O.E.E), podem ser correlacionados como hipótese de função linear. Baseando-se na equação linear  $Y = Ax + B$ , foi assumido que a equação 3.3 pode ser assumida a seguinte função linear da produção (t) em função do indicador O.E.E (%):

$$\text{Produção (t)} = 27250 + 719054 \times (\text{O.E.E}) \% \quad (3.3)$$

Após analisar que o principal KPI que esteve com maior percentual relacionado às perdas foi a utilização (cerca de 79 %), será analisado através do gráfico de Pareto durante o período de janeiro a dezembro de 2019, quais as principais causas/problemas que estiveram correlacionados com a utilização, conforme Tabela 3.4.

Tabela 3.4- Paradas planejadas e não planejadas relacionadas ao fator da utilização. (Contribuição do autor, 2019).

Área	Causa	Horas		
		Paradas Não Planejadas (h)	Paradas Planejadas (h)	Total
Geomecânica	Atirantamento de rocha	314	838	1.152
Geomecânica	Abatimento de rocha	206	772	978
Produção	Troca de bit's	360	605	965
Geologia	Emanação de gás	847	0	847
Ventilação	Aumento de temperatura do painel	639	0	639
Produção	Falta de operador	476	0	476
Manutenção	Falta equipamento de apoio	473	0	473
Produção	Inspeção de equipamento	350	24	374
Produção	Falta de caminhonete	332	0	332
Geomecânica	Piso irregular	322	0	322
Ventilação	Prolongamento de Duto	217	19	236
<b>Total</b>		<b>4.536</b>	<b>2.258</b>	<b>6.794</b>

Com base na Tabela 3.4 serão divididas quantitativamente as causas de horas paradas, por paradas não planejadas e não planejadas por causas conforme Figura 3.10.

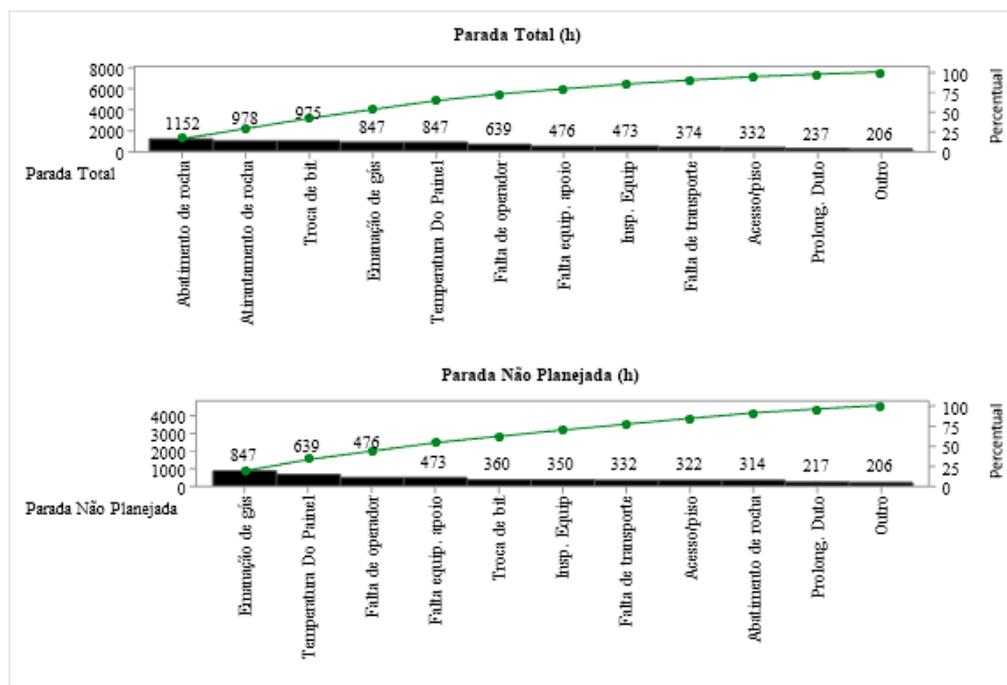


Figura 3.10- Diagrama de Pareto de perdas em horas total e não planejada. (Contribuição do autor, 2019).

Baseando-se nas principais paradas de lavra, foi proposta uma matriz de prioridades, buscando realizar a correlação entre as soluções propostas por critérios de escala definidos. Para essa matriz serão utilizados os seguintes critérios: produtividade (t/h), facilidade, rapidez, impacto sobre a causa raiz. A matriz facilita a uma melhor priorização de potenciais causas e problemas do processo, para buscar a tratativa aos problemas de maior relevância ao processo correlacionando a fatores qualitativos de tempo, esforço e eficiência produtiva, descritos na Tabela 3.5.

Tabela 3.5- Matriz de prioridades de problemas. (Contribuição do autor, 2019).

Causas	Prod. (t/h)	Facilidade	Rapidez	Impacto Positivo Sobre a Causa	Total	Total
	7	8	9	10		
<b>Abatimento de Choco</b>	3	1	3	3	86	7º
<b>Atirantamento de Choco</b>	3	3	3	3	102	3º
<b>Deslocamento Entre Painéis</b>	5	1	3	3	100	4º
<b>Emanação de gás</b>	5	0	0	3	65	9º
<b>Falta de Caminhonete</b>	3	3	1	1	64	10º
<b>Falta de equipamento de apoio</b>	3	3	1	3	84	8º
<b>Falta de operador</b>	5	0	1	5	94	5º
<b>Insp. Equipamento</b>	3	5	1	3	100	4º
<b>Piso irregular</b>	5	3	3	5	136	1º
<b>Prolongamento de Dutos</b>	1	3	3	3	88	6º
<b>Temperatura Painei</b>	5	3	3	5	136	1º
<b>Transporte Gaiola</b>	3	3	0	1	55	11º
<b>Troca de Bit's</b>	3	3	1	1	64	10º

Legenda:  
Correlação forte – 5    Correlação moderada – 3    Correlação fraca – 1    Correlação ausente – 0

Com referência da Tabela 3.6 e Figura 3.11, serão segregadas as possíveis causas identificadas baseada na matriz de esforço e impacto e obedecendo a premissa de escolha daqueles problemas que detenham baixo esforço de execução e tempo e alto impacto ao processo e que possam auxiliar a melhoria da utilização.

Tabela 3.6- Matriz de esforço e impacto. (Contribuição do autor, 2019).

	Entradas do Processo Causas de Paradas Peso	Possíveis Causas Prioritárias			Total	Total (%)	Impacto	Esforço
		Horas de Equipamentos Parados	Sequenciamento de produção	Produção diária				
		10	8	9				
X1	Troca de bit's	1	3	1	43	4,33%	Baixo	Alto
X2	Inspeção de equipamento	1	1	1	27	2,72%	Baixo	Baixo
X3	Emanação de gás	5	5	5	135	13,58%	Alto	Alto
X4	Aumento de temperatura Painei	5	5	5	135	13,58%	Alto	Alto
X5	Atirantamento de rocha	5	3	3	101	10,16%	Alto	Alto
X6	Abatimento de rocha	5	3	3	101	10,16%	Alto	Alto
X7	Prolongamento de dutos	1	1	1	27	2,72%	Baixo	Baixo
X8	Transporte gaiola	3	1	1	47	4,73%	Baixo	Alto
X9	Falta de operador	5	5	5	135	13,58%	Alto	Alto
X10	Falta de caminhonete	3	3	3	81	8,15%	Alto	Alto
X11	Falta de equipamento de apoio	3	3	3	81	8,15%	Alto	Alto
X12	Piso irregular	3	3	3	81	8,15%	Alto	Alto

Legenda:  
Correlação forte – 5    Correlação moderada – 3    Correlação fraca – 1    Correlação ausente – 0

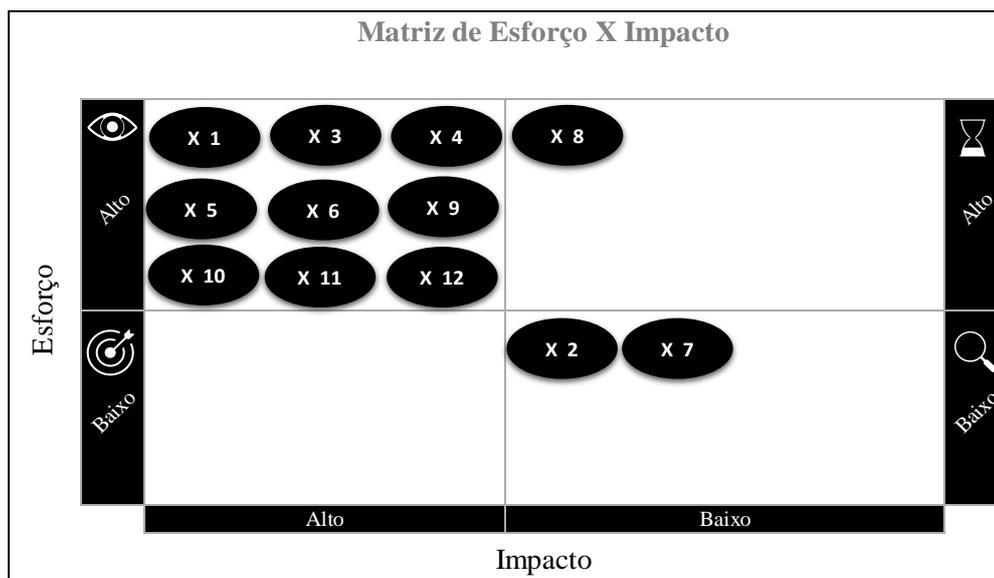


Figura 3.11- Matriz de esforço e impacto para os problemas prioritários.  
(Contribuição do autor, 2019).

Analisado a Figura 3.10 foi montada a seguinte escala de priorização:

- ✓ 1º- alto impacto x baixo esforço- (0 oportunidades).
- ✓ 2º- alto impacto x alto esforço- (8 oportunidades).
- ✓ 3º- posição baixo impacto x baixo esforço- (2 oportunidades).
- ✓ 4º- baixo impacto x alto esforço- (2 oportunidades).

Pela matriz de esforço e impacto, não ocorreram oportunidades descritas como: alto impacto x baixo esforço, no qual será dada continuidade ao sequenciamento de priorização de causas avaliadas como: alto impacto x alto esforço. Tiveram 8 causas, no qual será optado por aquela com impacto significativo de horas não planejadas, neste caso o (X5) - aumento de temperatura do painel. Não foi optado pela emissão de gás, pela falta de dados, estudos e bases técnicas para a situação. Em 2019, a causa de aumento de temperatura, resultou em -22.596 t de ROM, gerando perdas estimadas de R\$ 5.120.000 por produto de venda, conforme memória de cálculo na Figura 3.12.

<b>MEMÓRIA DE CÁLCULO DE PERDA</b>			
<b>Métricas Financeiras</b>			
	Métrica	Unidade	<b>2.019</b>
Planejado	<b>Volume Programado KCl</b>	kt	484,877
	<b>Margem</b>	RS/t	1.010
<b>Métricas Técnicas</b>			
	Métrica	Unidade	<b>2.019</b>
Perdas 2019	<b>Horas Paradas Painel</b>	h	639
	<b>ROM</b>	t	22.596
	<b>Teor</b>	%	25%
	<b>Recuperação Met.</b>	%	82%
	<b>KCl</b>	t	5.071
<b>Resultados Financeiros 2019:</b>			
	Item	Unidade	<b>2.019</b>
Perda Estimada	$\Delta$ Receita	R\$	5.120.000
	$\Delta$ Custo	R\$	0
	$\Delta$ <b>EBITDA</b>	<b>R\$</b>	<b>5.120.000</b>
	$\Delta$ <b>Investimento Corrente</b>	<b>R\$</b>	<b>0</b>

Figura 3.12- Memória de cálculo financeiro de perda. (Contribuição do autor, 2020).

### 3.6 Redução do número de horas paradas por temperatura em painel de lavra

#### 3.6.1 Identificação do problema

Um dos principais problemas que geram paradas no processo de lavra na mina, refere-se ao aumento de temperatura do painel. Em conformidade com a NR 15, o regime de trabalho no local é considerado como escala moderada, preconizando que as atividades devem ser feitas sempre a temperaturas inferiores a 31,1°C IBUTG, caso contrário haverá paralisação da atividade até equalização da temperatura máxima permitida. Assim é necessária uma efetiva verificação dos locais com aumento de temperatura nas frentes de lavra. Pela Figura 3.13, nota-se que dois painéis de lavra denominados: (painel 1, com impacto de 272 h) e (painel 2, com impacto de 233 h), representaram 80 % das horas paradas (h) por temperatura em 2019.

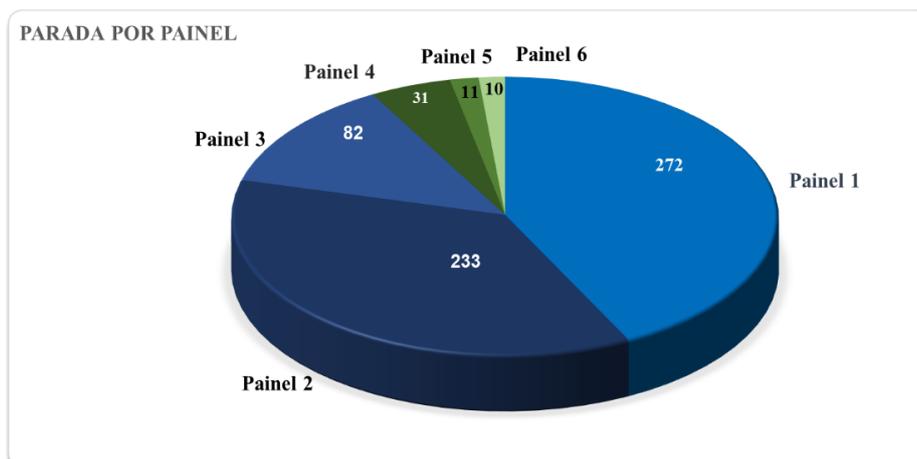


Figura 3.13- Tempo de parada de painel de lavra em horas. (Contribuição do autor, 2019).

Como as informações das interrupções por cada painel, serão verificadas a localização das frentes de lavra através da Figura 3.14, e o distanciamento dos painéis ao principal circuito de ventilação da mina na Tabela 3.7, com o intuito da observação do efeito da distância média do circuito de ventilação, relacionado número de horas paradas.

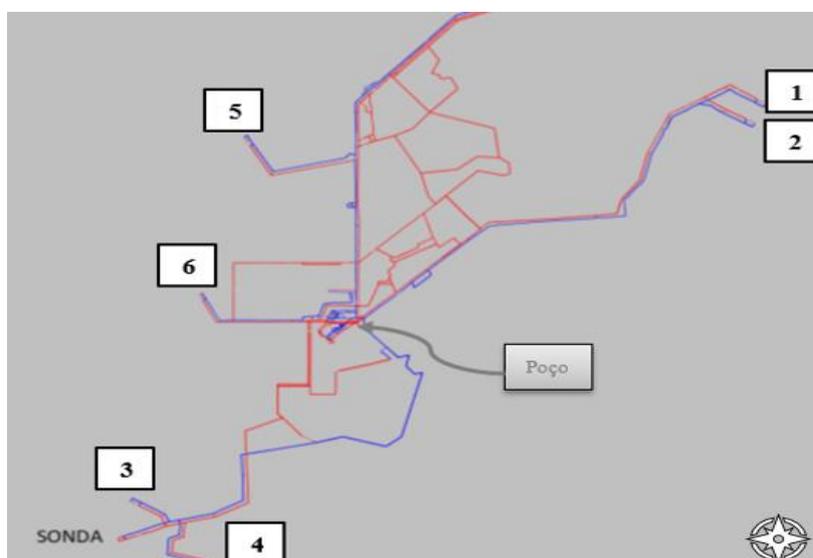


Figura 3.14- Layout de disposição de painel. (Contribuição do Autor, 2019).

Tabela 3.7- Distância dos painéis ao principal centro de ventilação da mina.  
(Contribuição do autor, 2019).

Ponto Entrada	Localização de Lavra	Distância (Km)
Poço	Painel 01	5,87
Poço	Painel 02	5,69
Poço	Painel 03	3,29
Poço	Painel 04	3,32
Poço	Painel 05	2,75
Poço	Painel 06	1,92

Verifica-se pela Tabela 3.7, que os painéis 1 e 2 são os que detêm maiores perdas por horas paradas, sendo aqueles com maior distância média aos ventiladores principais.

### 3.6.2 Definição e medição do problema

O principal indicador para ocorrência das paradas de frentes de lavra na mina refere-se ao aumento da temperatura  $\geq 31,1$  °C IBUTG. Em 2019 cerca de 503 paradas pelo efeito da temperatura, foram localizados nos painéis 1 e 2, representando uma média de 42 h/mensais. Com base no sequenciamento da escolha de projetos, verifica-se que há uma oportunidade a ser trabalhada, devendo ser então realizada um contrato de projeto (*Project Charter*) contendo as principais informações, conforme Figura 3.15.

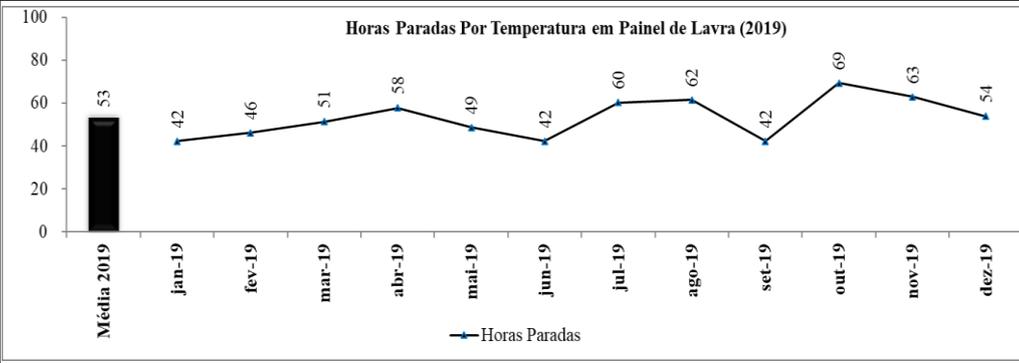
<b>Contrato de Projeto</b> <b>Project Charter</b>																													
<b>Projeto:</b> Redução Do Número De Horas Paradas Por Temperatura Em Painel De Lavra	<b>Líder:</b> Alisson Brasil																												
<b>Gerência:</b> Operação de Mina	<b>Início:</b> 17/12/2019																												
<b>Área:</b> Ventilação de Mina	<b>Término:</b> 02/07/2020																												
<b>Descrição do Problema</b>																													
No ano de 2019 o número de horas paradas não planejadas em virtude da temperatura dos painéis foi de 639 h, gerando uma perda de R\$ 5.120.000, considerando baseline de 2019.																													
<b>Objetivo do Projeto</b>																													
Redução do número de horas paradas não planejadas pelo setor de ventilação de mina.																													
<b>Justificativa / Histórico</b>																													
 <table border="1"> <caption>Horas Paradas Por Temperatura em Painel de Lavra (2019)</caption> <thead> <tr> <th>Mês</th> <th>Horas Paradas</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Média 2019</td> <td>53</td> </tr> <tr> <td>jan-19</td> <td>42</td> </tr> <tr> <td>fev-19</td> <td>46</td> </tr> <tr> <td>mar-19</td> <td>51</td> </tr> <tr> <td>abr-19</td> <td>58</td> </tr> <tr> <td>mai-19</td> <td>49</td> </tr> <tr> <td>jun-19</td> <td>42</td> </tr> <tr> <td>jul-19</td> <td>60</td> </tr> <tr> <td>ago-19</td> <td>62</td> </tr> <tr> <td>set-19</td> <td>42</td> </tr> <tr> <td>out-19</td> <td>69</td> </tr> <tr> <td>nov-19</td> <td>63</td> </tr> <tr> <td>dez-19</td> <td>54</td> </tr> </tbody> </table>		Mês	Horas Paradas	Média 2019	53	jan-19	42	fev-19	46	mar-19	51	abr-19	58	mai-19	49	jun-19	42	jul-19	60	ago-19	62	set-19	42	out-19	69	nov-19	63	dez-19	54
Mês	Horas Paradas																												
Média 2019	53																												
jan-19	42																												
fev-19	46																												
mar-19	51																												
abr-19	58																												
mai-19	49																												
jun-19	42																												
jul-19	60																												
ago-19	62																												
set-19	42																												
out-19	69																												
nov-19	63																												
dez-19	54																												
<b>Definição da Meta</b>	<b>KPIs</b>																												
Redução em 70 % de horas parada de painéis de lavra, por aumento de temperatura. Média de 53 horas/mês para 16 h.	h																												
<b>Limites do Projeto (Inclui / Exclui)</b>																													
<b>Inclui:</b> Treinamentos, revisão de procedimentos, simulação de circuito de ventilação, tempo de ciclo e takt time, utilização de equipamentos, visitas técnicas.																													
<b>Exclui:</b> Compra de equipamentos, aumento do número de funcionários (headcount).																													
<b>Premissas e Restrições do Projeto</b>																													
<b>Premissas:</b> Concordância com as metas orçamentárias, missão, visão e valores, procedimentos de segurança e meio ambiente.																													
<b>Restrições:</b> Disponibilidade física e utilização previstas no planejamento 2020. Mesma configuração de equipamentos a diesel (sem aumento)																													
<b>Requisitos do Cliente</b>																													
Atendimento ao planejamento e controle de produção ano base 2020.																													
<b>Contribuições para o Negócio</b>																													
Aumento do número de horas disponíveis para atividades de lavra.																													
Valor do Ganho Financeiro (R\$):	R\$ 298.667 mês.																												

Figura 3.15- *Project Charter* para redução do número de horas paradas por temperatura em painel de lavra. (Contribuição do autor, 2019).

Através do quantitativo do número de horas paradas nos painéis 1 e 2, foram coletados 481 dados de temperatura (IBUTG °C) e vazão (m<sup>3</sup>/s), sendo estratificadas por meses, apresentado na Tabela 3.8.

Tabela 3.8- Temperatura média e vazão nos painéis 1 e 2. (Contribuição do autor, 2020).

Período	Painel De Lavra 01				Painel De Lavra 02			
	Temperatura IBUTG °C				Temperatura IBUTG °C			
	Média	Mínima	Máxima	Desv. Padrão	Média	Mínima	Máxima	Desv. Padrão
jan-19	29,3	28,4	29,0	0,3	30,6	30,7	31,9	0,4
fev-19	29,5	28,3	30,0	0,4	30,4	28,5	31,9	1,1
mar-19	29,6	28,0	30,0	0,4	30,1	28,5	32,3	1,1
abr-19	29,0	28,5	29,0	0,3	30,4	28,5	31,3	1,3
mai-19	30,8	28,5	32,0	0,9	30,6	28,0	31,9	1,1
jun-19	30,4	28,0	32,0	1,3	30,1	28,0	31,7	1,3
jul-19	30,9	28,0	32,0	1,1	30,3	28,3	32,1	1,4
ago-19	30,7	28,4	32,0	1,1	30,7	29,8	32,3	1,0
set-19	30,1	28,3	32,0	1,2	30,6	30,3	32,0	1,1
out-19	30,8	29,2	32,0	0,7	30,8	29,1	32,2	0,8
nov-19	30,7	29,3	32,0	0,6	30,5	28,7	31,9	1,1
dez-19	30,9	29,6	32,0	0,7	30,8	28,5	31,7	1,0
Período	Painel De Lavra 01				Painel De Lavra 02			
	Vazão de ar (m³/s)				Vazão de ar (m³/s)			
	Média	Mínima	Máxima	Desv. Padrão	Média	Mínima	Máxima	Desv. Padrão
jan-19	26,0	23,0	29,0	2,2	24,0	21,0	25,2	1,8
fev-19	25,0	22,0	31,0	2,1	23,0	21,0	29,0	7,1
mar-19	25,0	20,0	31,0	2,4	24,0	22,0	28,0	6,0
abr-19	26,0	23,0	29,0	1,4	23,0	22,0	29,0	8,2
mai-19	25,0	22,0	29,0	6,4	24,0	22,0	31,0	7,4
jun-19	27,0	22,0	31,0	8,1	25,0	21,0	30,0	8,3
jul-19	24,0	21,0	31,0	6,8	25,0	21,0	27,0	7,5
ago-19	24,0	22,0	29,0	6,6	23,0	20,0	27,0	6,5
set-19	25,0	23,0	32,0	7,2	24,0	21,0	29,0	7,4
out-19	23,0	22,0	29,0	4,6	22,0	20,0	27,0	6,1
nov-19	23,0	22,0	29,0	3,5	24,0	20,0	29,0	7,1
dez-19	22,0	21,0	28,0	4,3	23,0	20,0	28,0	6,5

Analisando os dados verificou que apesar das médias sempre estivessem abaixo de 31,1 °C, o processo atual não é capaz de manter temperatura dentro o limite estabelecido durante o processo o que tem a ver com a capacidade do

processo. A capacidade ou conhecido como capacidade do processo (cp e cpk) medem o potencial do processo, ou seja, mede se o processo atual é capaz. A Figura 3.16 e 3.17 mostram a capacidade medida das temperaturas dos painéis 1 e 2.

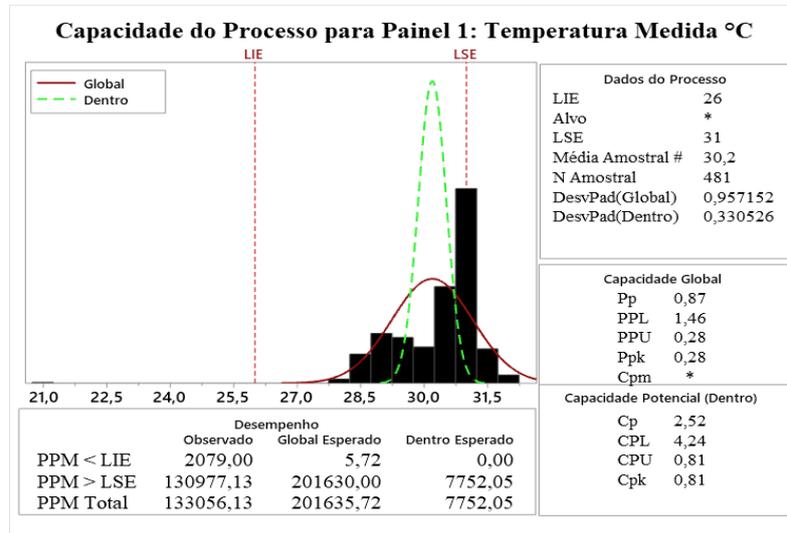


Figura 3.16- Estudo de capacidade do processo do painel 1. (Contribuição do autor, 2020).

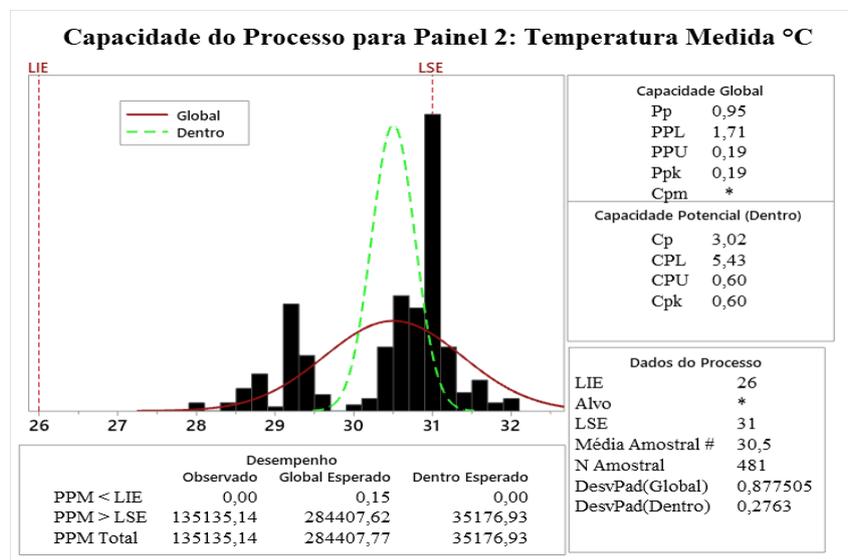


Figura 3.17- Estudo de capacidade do processo do painel 2. (Contribuição do autor, 2020).

Através das Figura 3.16 e 3.17 analisamos que:

✓ Painel 1:  $C_p$  tem valor de 2,52 e  $C_{pK}$  de 0,81, mostrando que  $C_{pK} \leq C_p$ , ou seja, o processo atual está descentralizado, sendo o indicar atual que o processo não consegue manter a temperatura abaixo de 31,1 °C.

✓ Painel 2:  $C_p$  tem valor de 3,02 e  $C_{pK}$  de 0,60, desta forma o  $C_{pK} \leq C_p$ , confirmando que o processo está descentralizado, sendo o indicar atual que o processo não consegue manter a temperatura abaixo de 31,1 °C.

Um processo vai ser tido como capaz quando 6 desvios padrão (99,74 %) ou quando seu processo couber entre os limites especificados ( $C_p$  e  $C_{pK} \geq 1$ ), mesmo não estando perfeitamente centralizado. Na indústria em geral o valor exigido para  $C_p$  e  $C_{pK}$  é  $\geq 1,33$ , conforme já discutido no item 2.2.4.

Explicando as temperaturas e vazão de ar nos painéis 1 e 2, pelo uso do Minitab 18.0, podem ser considerados as seguintes situações aos painéis:

✓ Painel 1: A média de entrada de vazão de ar de neste painel foi de 24,1 m<sup>3</sup>/s, e temperatura média IBUTG de 30,2 °C. Os dados de temperatura e vazão são considerados normais, pois  $P < 0,05$  é um indicador de normalidade, sendo valores encontrados de 0,035 e 0,019 respectivamente para temperatura e vazão. O  $R^2$  (aj) mostra que a relação de temperatura e vazão, pode ser ajustado a 78,7 % dos dados obtidos deste painel, ao modelo da equação (3.1). A Figura 3.18 mostra estes dados estatísticos obtidos. A abcissa  $y$  representa a quantidade de medições encontradas para as temperaturas e vazões das 481 medidas coletadas para o painel 1.

$$Temperatura \text{ } ^\circ C = 41,34 - 0,4534 \times Vaz\tilde{a}o \left( \frac{m^3}{s} \right) \quad (3.1)$$

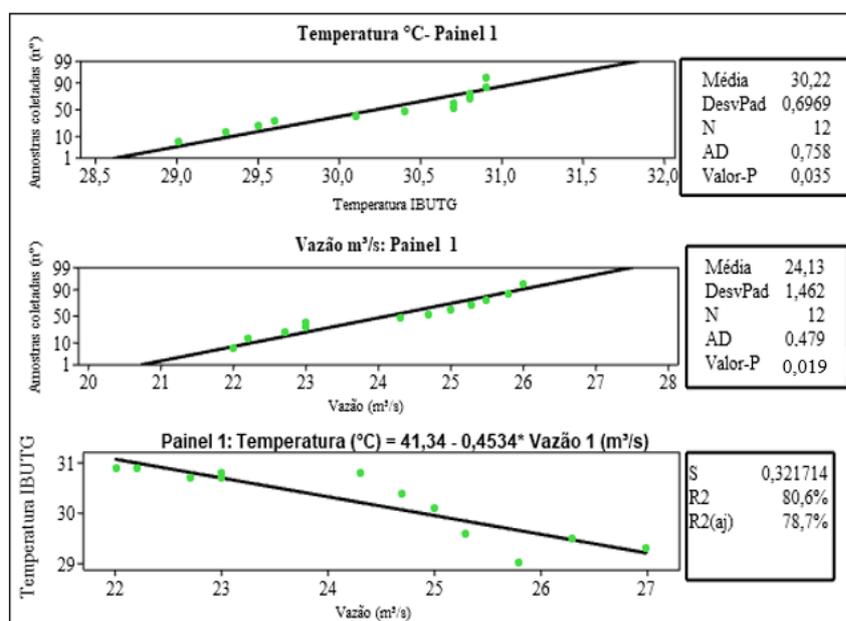


Figura 3.18- Análise estatística painel de lavra 1. (Contribuição do autor, 2020).

✓ Painel 2: A média de entrada de vazão de ar de neste painel foi de 23,6 m<sup>3</sup>/s, e temperatura média IBUTG de 30,5 °C. Os dados de temperatura e vazão são considerados normais, pois  $P < 0,05$  sendo um indicador de normalidade, sendo valores encontrados de 0,039 e 0,047 respectivamente para temperatura e vazão. O  $R^2$  (aj) mostra que a relação de temperatura e vazão, pode ser ajustado a 78,4 % dos dados obtidos deste painel, ao modelo da equação (3.2). A Figura 3.19 mostra estes dados estatísticos obtidos. A abcissa  $y$  representa a quantidade de medições encontradas para as temperaturas e vazões das 481 medidas coletadas para o painel 2.

$$Temperatura\ ^\circ C = 36,10 - 0,2367 \times Vaz\tilde{a}o\left(\frac{m^3}{s}\right) \quad (3.2)$$

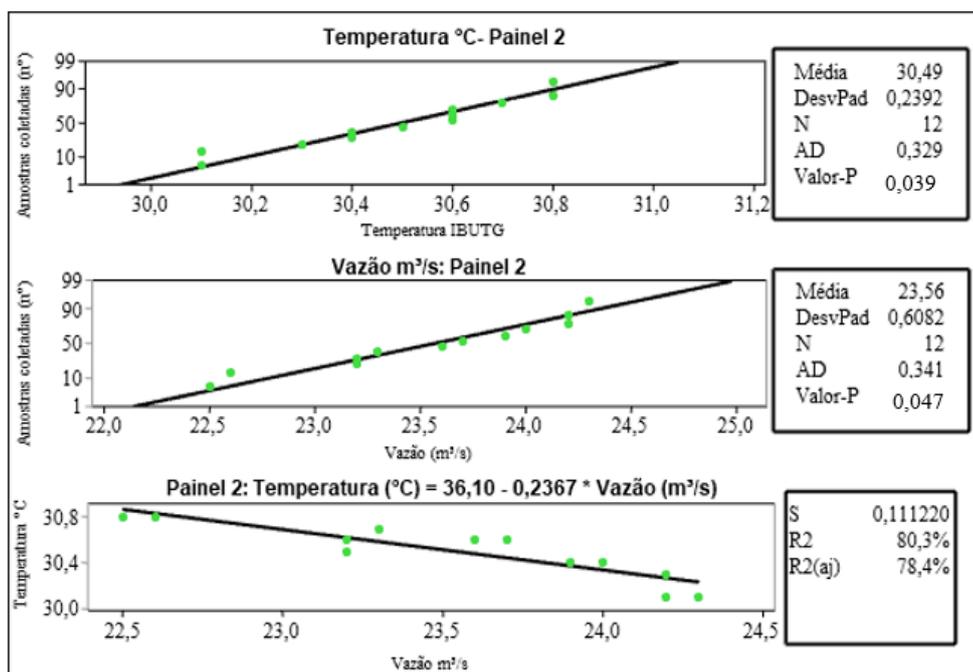


Figura 3.19- Análise estatística painel de lavra 2. (Contribuição do autor, 2019).

Como a verificação da vazão de correlacionado com a temperatura medida nas frentes de lavra, necessita-se observar quais causas potenciais podem estar diretamente interligadas com o problema do aumento de temperatura dos painéis com foco ao aumento da vazão de ar a estes locais. Observa-se que o grau geotérmico das rochas foi considerado sempre constante, a temperatura ambiente constante (27,2 °C), capacidade da usina de refrigeração e ventiladores principais dentro dos parâmetros mínimos exigidos.

Para o entendimento das possíveis causas a ferramenta de Diagrama de Ishikawa torna-se importante, a fim de reunir oportunidades potenciais ao problema, conforme Figura 3.20.

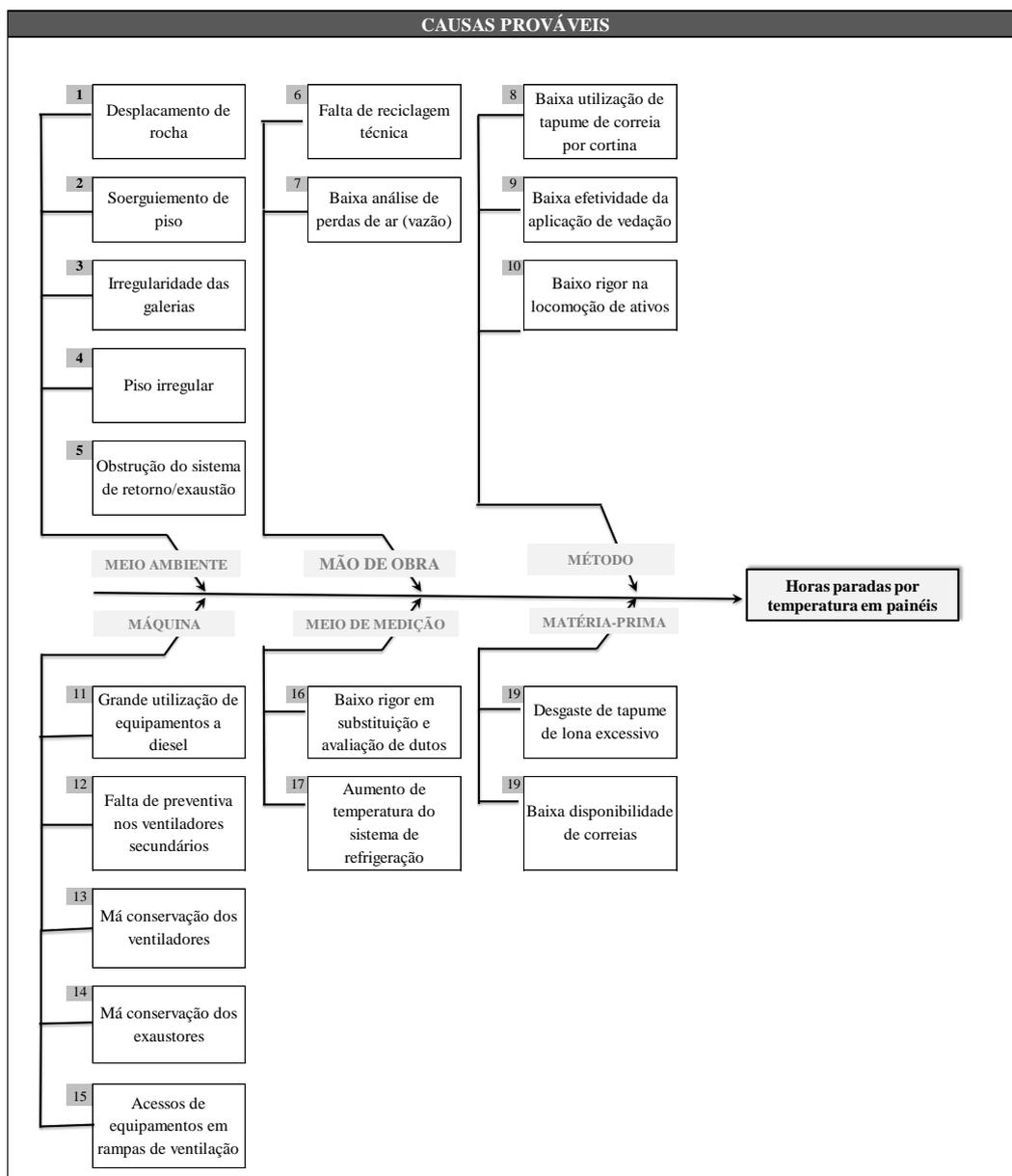


Figura 3.20- Diagrama de Ishikawa para possíveis causas do problema.

(Contribuição do autor, 2020).

Com a ferramenta de matriz de priorização relacionadas pela Tabela 3.9 e Figura 3.21, verificou-se de forma qualitativa quais problemas tendem a ter maior impacto para a oportunidade/projeto. Obedecendo a escala de priorização, sendo 1° de maior prioridade e 4° menor prioridade temos que:

- ✓ 1°- Baixo esforço x alto impacto. (Avaliado em 7 possíveis causas).
- ✓ 2°- Alto esforço x alto impacto. (Avaliado em 7 possíveis causas).
- ✓ 3°- Baixo esforço x baixo Impacto. (Avaliado em 2 possíveis causas).

✓ 4º- Alto esforço x baixo impacto. (Avaliado em 2 possíveis causas).

Tabela 3.9- Matriz de priorização. (Contribuição do autor, 2020).

MATRIZ DE PRIORIZAÇÃO									
Título: Redução Do Número De Horas Paradas Por Temperatura Em Painel De Lavra					Área: Ventilação de Mina				
Matriz De Priorização	Problemas Prioritários (Y's)				Total	Posição	Impacto	Esforço	
	Aumento de Temperatura	Recurso Financeiro	Rapidez de Execução	Facilidade					
<b>Peso</b>	<b>10</b>	<b>7</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	-	-			
Causa Potencial (X's)	Deslocamento de rocha	1	1	1	1	25	12º	Alto	Alto
	Soerguimento de piso	1	3	1	1	39	11º	Alto	Alto
	Irregularidade das galerias	3	3	1	3	65	8º	Alto	Alto
	Piso irregular	1	3	1	1	39	11º	Baixo	Alto
	Obstrução do sistema de retorno/exaustão	5	5	1	1	93	1º	Alto	Alto
	Falta de reciclagem técnica	1	1	1	1	25	12º	Alto	Baixo
	Baixa análise de perdas de ar (vazão)	3	5	3	3	89	2º	Alto	Baixo
	Baixa utilização de tapume de correia	3	3	3	5	81	4º	Alto	Baixo
	Baixa efetividade da aplicação de vedação	3	3	3	5	81	4º	Alto	Baixo
	Baixo rigor na locomoção de ativos	1	1	5	4	54	9º	Alto	Baixo
	Grande utilização de equipamentos a diesel	5	5	0	1	88	3º	Alto	Alto
	Falta de plano de preventiva nos ventiladores secundários	1	3	1	1	39	11º	Alto	Baixo
	Má conservação dos ventiladores	3	3	1	3	65	8º	Alto	Baixo
	Má conservação dos exaustores	3	3	1	3	65	8º	Alto	Baixo
	Acessos de equipamentos em rampas de ventilação	1	5	3	3	69	6º	Alto	Baixo
	Baixo rigor em substituição e avaliação de dutos	1	1	3	3	41	10º	Baixo	Baixo
	Aumento da temperatura no sistema de refrigeração	5	3	3	1	89	2º	Alto	Alto
	Desgaste excessivo do tapume de lona	5	3	1	1	79	5º	Alto	Alto
	Baixa disponibilidade de correias para tapumes	1	1	3	3	41	10º	Baixo	Baixo
	<b>LEGENDA: 5 - Correlação Forte 3 - Correlação moderada 1 - Correlação fraca 0 - Correlação ausente</b>								

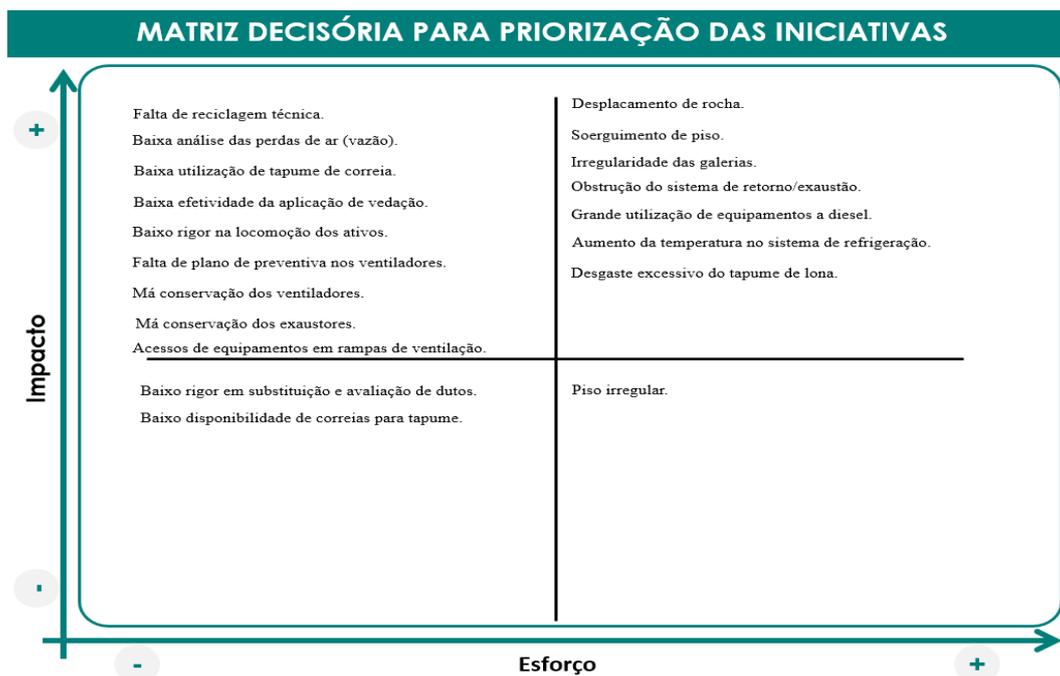


Figura 3.21- Quadrante de priorização para as iniciativas. (Contribuição do autor, 2020).

Baseando-se na matriz decisória e priorização, as principais causas que serão estudadas serão:

✓ Alto impacto x baixo esforço: falta de reciclagem técnica; baixa análise de perdas de ar; baixa utilização de tapumes de correia; baixa efetividade da aplicação de vedação; baixo rigor na locomoção de ativos; falta de plano de preventiva dos exaustores e ventiladores; acessos de equipamentos em rampas de ventilação.

✓ Alto impacto x alto esforço: deslocamento de rocha; soerguimento de piso; irregularidade das galerias; obstrução do sistema de retorno/exaustão; grande utilização de equipamentos a diesel; aumento de temperatura do sistema de refrigeração; desgaste excessivo do tapume de lona.

✓ Baixo impacto x baixo esforço: baixo rigor na substituição e avaliação de dutos; baixa disponibilidade de correias para tapume.

✓ Baixo impacto x alto esforço: Piso irregular.

### 3.7 Análise de perdas do circuito de ventilação

Com base no Diagrama de Pareto da Figura 3.11, foram analisadas as paradas dos painéis em virtude do aumento de temperatura em 2019. Do total de 639 horas

paradas por motivos de temperatura, foram segregadas e mapeadas com fim de auxiliar as possíveis causas relacionadas ao aumento de temperatura nos painéis em 2019, conforme Pareto da Figura 3.22.

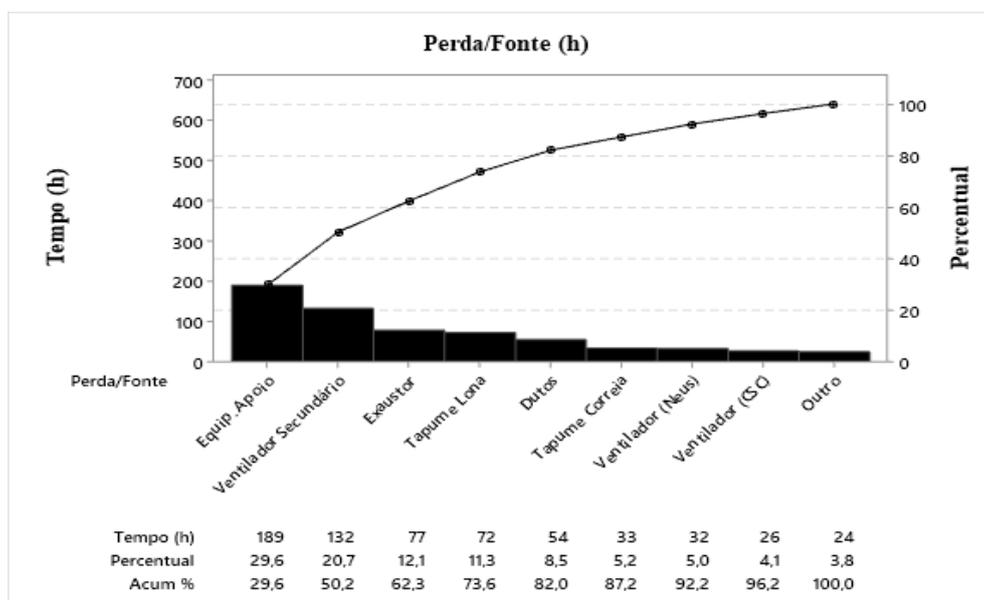


Figura 3.22- Diagrama de Pareto de perdas em horas por alta temperatura.  
(Contribuição do autor, 2019).

Verifica-se que dentre os potenciais problemas do circuito, os que mais se destacam são: equipamento de apoio (relacionado ao aumento de equipamentos a diesel para atividades de apoio); ventilador secundário (corretivas); exaustor (corretiva); tapume lonas (rasgadas e/ou abertas); dutos rasgados e/ou fora do padrão; tapume correia (rasgados e/ou abertas).

A partir desta análise de potenciais causas no circuito de ventilação, podem ser focadas algumas ações ao plano de melhoria. Foi elaborado o *FMEA* (análise de modo de falha e efeito) inicial ao processo conforme Tabela 10, a fim de já se observar potenciais problemas e efeitos de falhas ao processo.

Tabela 3.10- Análise de modo de falha e efeito. (Contribuição do autor, 2020)

Descrição do Processo			Setor				
Circuito de Ventilação Principal e Secundária da Mina			(Ventilação de Mina)				
Etapa do processo	Função e requisitos do processo	Modos de falha potencial	Efeitos potenciais da falha	Severidade	Ocorrência	Deteção	Priorizaçã o
Dimensionamento Circuito de Ventilação Principal	Dimensionamento da quantidade de ar vazão e temperatura para acessos, painéis de lavra, sonda e apoio	Aumento da distância dos painéis ao sistema de refrigeração não programado	Não ocorreu plano de longevidade da mina, baseando-se na ativa descoberta do depósito	10	2	1	20
		Modificação do tipo de equipamento de carga, transporte e apoio na mina	Mudança de tecnologia	7	5	2	70
Dimensionamento Circuito de Ventilação Secundário	Dimensionamento de vazão de ar para painéis de lavra e sonda, e exaustão de gases e particulados	Modificação do layout de painéis de lavra	Redução da velocidade de ar nos painéis de lavra	4	5	3	60
		Erro no sistema de compra de exaustão e ventilação	Insuficiência de vazão de ar para as frentes de lavra e sonda	9	3	1	27
Instalação Circuito de Ventilação Secundário	Disposição dos ventiladores e exaustores secundários fora de especificação	Não ocorrer diferença de pressão menina entre a insuflação e exaustão para diluição de gases e poeira	Recirculação de ar e aumento de temperatura	7	6	3	126
Avaliação qualitativa e quantitativa do ventilador principal	Verificar perdas de ar (m <sup>3</sup> /s) em acessos e painéis de lavra	Falta de medição diária da vazão real dos ventiladores principais	Paradas do ventilador por corretiva	8	6	1	48
Avaliação qualitativa e quantitativa do exaustor e ventilador secundário	Medir vazão, vibração dos exaustores e ventiladores dos painéis de lavra	Não há ferramenta disponível (checo list) para avaliação dos ventiladores e exaustores	Paradas do ventilador e/ou exaustor por corretiva	6	6	5	180
		Falta de preventiva em exaustores e ventiladores	Aumento de paradas por corretiva dos ativos.	4	5	5	100
		Baixo rigor no transporte de exaustores e ventiladores	Avarias no ventilador/exaustor	6	6	5	180
Transporte dos exaustores e ventiladores para as frentes de lavra	Realizar transporte com uso de LHD para proximidade as frentes de lavra	Não há transporte apropriado para deslocamento	Avarias no ventilador/exaustor	8	7	2	112
Deslocamento de dutos de ventilação	Realizar transporte de dutos de ventilação para acoplamento aos exaustores e ventiladores	Não há procedimento para transporte dos dutos	Avarias (rasgos e cortes) nos dutos.	5	8	4	160
		Não há transporte apropriado para deslocamento	Corretiva por vibração	5	5	6	150
Avaliação qualitativa e quantitativa do circuito de ventilação	Avaliar perdas no circuito de ventilação principal e secundário	Falta de preventiva entre portas de ventilação	Perdas de ar pelas aberturas nas portas	6	5	4	120
		Mudança de cortes e passes na lavra	Redução da velocidade de ar, por causa da variação de altura de galeria.	2	6	3	36
		Falta de limpeza nas galerias de retorno	Recirculação de ar e aumento de temperatura	6	5	4	120
		Falta de preventiva em tapumes de lonas e correias	Redução da vazão de ar nas frentes de lavra e sonda	6	4	3	72
		Não retirada de batentes/interseções entre cortes	Redução da velocidade de ar nas galerias e painéis de lavra	3	3	1	9
		Falta de programação de ações preventivas em tapumes de correias e cortinas	Perdas de ar pelos tapumes e cortinas	4	6	4	96
		Falta de análise de perdas de ar entre cortinas e tapumes sequenciados.	Baixa análise de perdas	6	8	3	144

### 3.8 Análise de perdas de ar

A análise visa manter a temperatura dentro dos índices admissíveis pelas normas regulamentadoras, para que não ocorra impactos na operação de lavra devido á temperatura. Através do circuito interno de ventilação, foram feitas medições estratégicas nos principais pontos de coleta, de forma a reproduzir a distribuição do circuito, para o entendimento de gargalos operacionais que resultem no aumento da temperatura. As medições foram feitas entre 28/01/20 a 02/03/20. Na região de entroncamento das passagens de rampas principais, porém as bases de vazão de ar e temperatura coletadas em 2019 forneceram bases para maior assertividade.

Com uso do software de simulação VUMA foi realizada uma validação em três dos principais circuitos na distribuição de vazão de ar, nas interseções das áreas norte, nordeste e sul da mina. Esses trechos foram usados para determinar alguns dos parâmetros importantes tais como: temperatura de bulbo seco na entrada (°C); temperatura de bulbo úmido na entrada (°C); temperatura de globo (°C); pressão na entrada (kPa); fluxo de ar (m<sup>3</sup>/s) e velocidade (m/s), e outros medidos também em campo como por exemplo: comprimento do trecho ou interseção mapeada (m); profundidade do painel e/ou acesso (m); área de seção transversal (m<sup>2</sup>); fator de fricção (kg/m<sup>3</sup>); fator de umidade. Os parâmetros dos ventiladores principais foram anexados para maior assertividade da análise (Anexo I).

Além da verificação dos ventiladores o modelamento necessita de alguns parâmetros e características para a realização do trabalho, na qual foi preciso assumir algumas simplificações, e valores descritos na Tabela 3.11.

Tabela 3.11- Dados para calibração do modelo do circuito de ventilação.

(Contribuição do autor, 2019).

Principais informações para simulação do VUMA			
Descrição	Unid	Valores adotados	Informações Software
Área	m <sup>2</sup>	9,0	
Fluxo de massa	Kg/s	48,0	
Volume Massa	M <sup>3</sup> /s	38,1	
Queda de pressão	Pa	1.442	
Resistência	Pa/(m <sup>3</sup> /s) <sup>2</sup>	0,9951	
Velocidade	m/s	4,2	
Temperatura úmida	°C	15,3	
Temperatura seca	°C	21,0	

- ✓ Na análise analítica não foram consideradas as perdas de carga para os reguladores, por meio da resistência equivalente;
- ✓ Considerada temperatura da superfície em média de 27,2 °C.
- ✓ Para o cálculo da queda de pressão por atrito, foi considerado o caso com a maior queda de pressão.
- ✓ Os valores de emissão de gases e poeira não foram considerados.
- ✓ O fator de atrito de Atkinson foi considerado constante e para a situação do escoamento turbulento e totalmente desenvolvido.
- ✓ As perdas de choque não foram utilizadas, em virtude da grande variedade na natureza de perdas e tempo para análise deste cálculo. Obs: As perdas de choque desconsideradas podem levar a resultados superestimados, porém válidos para o estudo inicial.
- ✓ A redistribuição da vazão de ar com uso de portas e reguladores torna-se para o cálculo ideal a não perda de vazão de ar, devido às resistências criadas pelas portas e reguladores.

O modelo atual apresenta a configuração apresentado na Figura 3.23, mostrando que a vazão inicial de ar (início da rampa de acesso) para a área nordeste está em torno e no máximo de 89 m<sup>3</sup>/s (representado pela seta em verde).

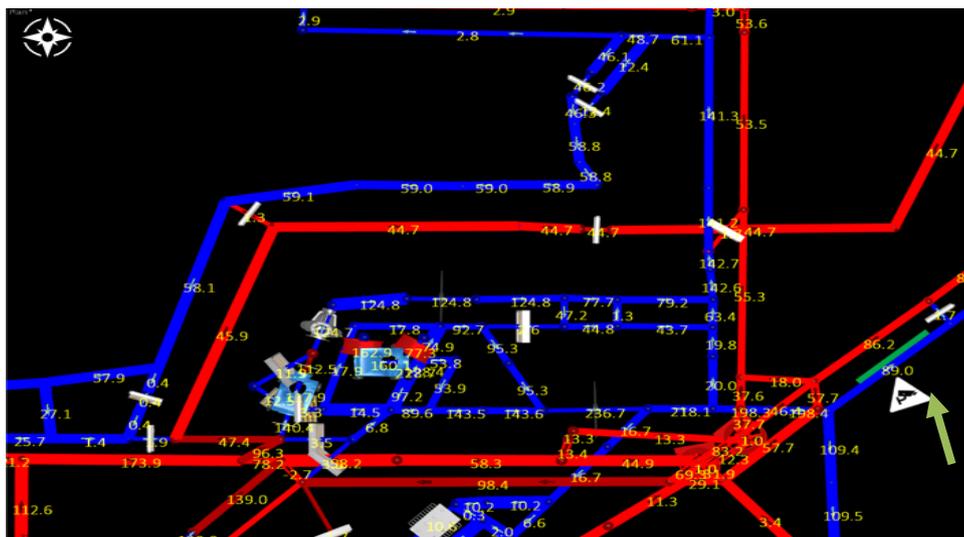


Figura 3.23- Vazão de ar atual para os painéis de lavra 1 e 2. (Contribuição do autor, 2020).

Conforme equações de correlação oriundas das equações lineares 3.1 e 3.2, foi calculado numericamente a vazão de ar mínima para os painéis 1 e 2, em que a necessidade mínima está em torno de 50 m<sup>3</sup>/s, demonstrado pela Tabela 3.12.

Tabela 3.12- Simulação da vazão mínima e ar para painel de lavra 1 e 2. (Contribuição do autor, 2020).

Dados Atuais			
Painél 1		Painél 2	
Equação: $Y=41,34-0,4534 *Vazão$		Equação: $Y=36,10-0,2367 *Vazão$	
Temperatura C°	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Temperatura C°	Vazão (m <sup>3</sup> /s)
37,7	10	34,2	10
33,5	20	31,9	20
32,6	22	31,6	21
31,8	24	31,4	22
31,4	25	31,2	23
30,9	26	30,9	24
<b>Total de ar necessário</b>		<b>50</b>	

Foram realizadas coletas de vazão em campo para o trecho de acesso aos painéis e verificou que a quantidade de vazão de ar disponibilizado aos painéis de lavra 1 e 2, estava em  $41 \text{ m}^3/\text{s}$  (respectivamente  $22 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $19 \text{ m}^3/\text{s}$ ), com necessidade mínima conjunta de  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ . A Figura 3.24 ilustra a sequência de perda de vazão de ar ao longo dos trechos para os painéis 1 e 2. Estes painéis estão em uma mesma profundidade (m), condições geológicas semelhantes e equipamentos de operação similares.

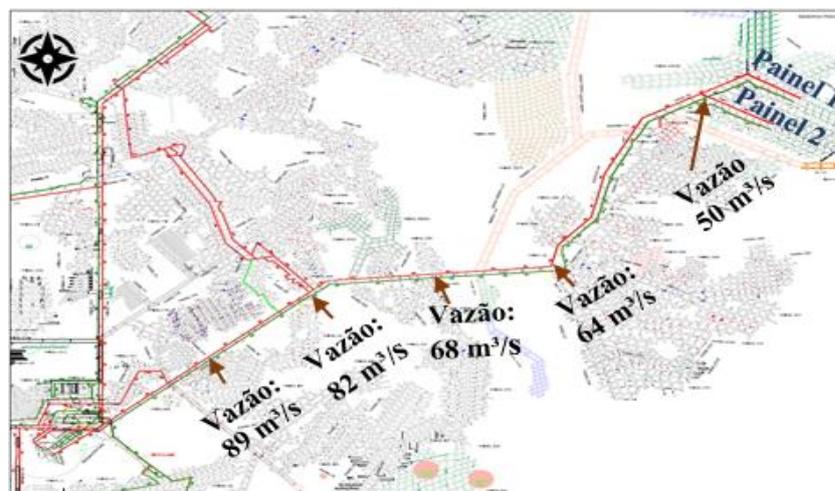


Figura 3.24- Perdas de ar ao longo dos painéis 1 e 2. (Contribuição do autor, 2020).

A Figura 3.25 demonstra que todos os painéis de lavra da mina, estão com perdas no circuito acima de 25 %, sendo uma evidência da necessidade de melhoria ao processo de ventilação de mina.

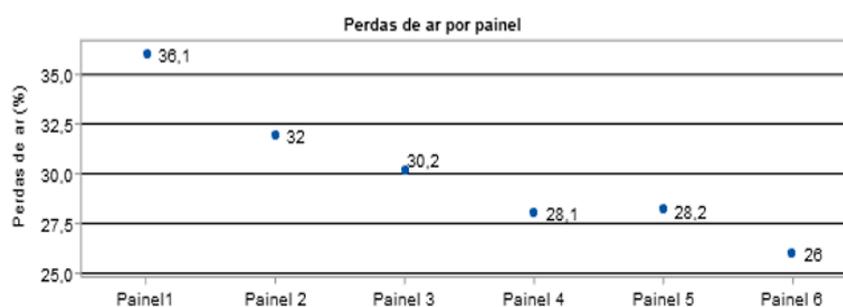


Figura 3.25- Perdas de ar (%) nos painéis de lavra. (Contribuição do autor, 2020).

A Tabela 3.13 indicadas pela área: norte (N) e sul (S) locais com grandes vazões de ar, porém com menor necessidade operacional (desperdício) em relação á painéis com maior demanda da área nordeste (NE). Com a avaliação quantitativa e evidenciada dos desperdícios, será avaliada a possibilidade de transferência do fluxo de ar e redistribuição do ar entre os painéis da mina, a fim de equalização do circuito e mantendo como premissa a não ocorrência de problemas semelhantes aos painéis 1 e 2.

Tabela 3.13- Vazão simulada x vazão necessária por área. (Contribuição do autor, 2020).

<b>Vazão: (Sem Regulador e Portas)</b>				
<b>Painel</b>	<b>Área</b>	<b>Vazão Medida (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Vazão Necessária (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Diferença (m<sup>3</sup>/s)</b>
1	NE	22	26	-4
2	NE	19	24	-5
3	N	61	33	+28
4	N	72	23	+49
5	S	46	38	+8
6	S	64	45	+19
<b>Total</b>		<b>284</b>	<b>189</b>	<b>+95</b>

Com o uso do software VUMA, foi estudado a viabilidade da instalação de um regulador e porta, para redistribuição na região de entroncamento das três áreas da mina (norte, nordeste e sul), conforme Figura 3.26. O princípio da simulação, terá como premissa o estudo do redirecionamento forçado/induzido de parte do fluxo de ar saindo de um dos ventiladores do circuito principal da mina (SSC) para os painéis 1 e 2 que atualmente tem problemas relacionados aos critérios de temperaturas admissíveis pela NR15.

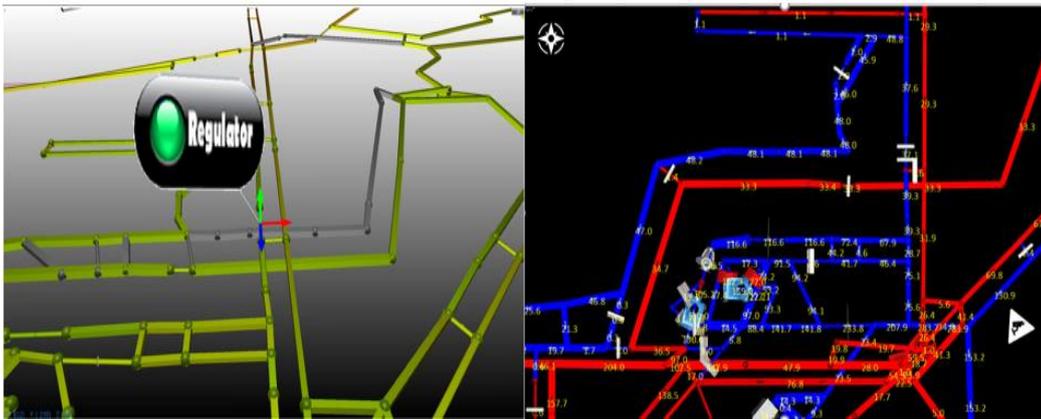


Figura 3.26- Simulação de vazão de ar atual para os painéis de lavra 1 e 2 com uso de reguladores/portas. (Contribuição do autor, 2020).

Na Figura 3.27, é mostrado que o ar poderia ser redirecionado e regulado, ou seja, teria o fluxo inverso em virtude das portas montadas com uso de regulador de vazão com uso de dutos sanfonados para equalização da vazão necessária aos painéis de lavra.

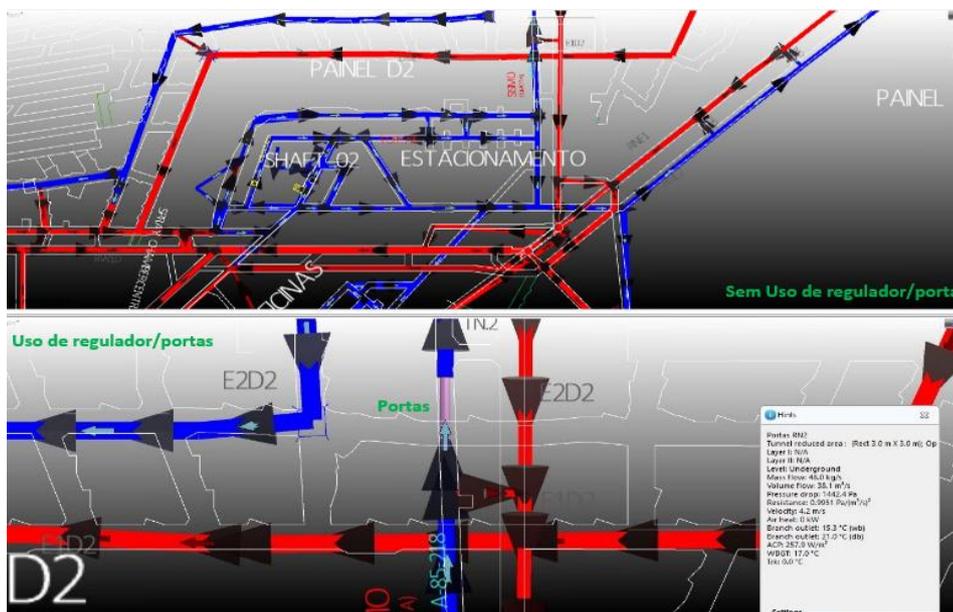


Figura 3.27- Simulação do circuito de ventilação, com uso de reguladores/portas. (Contribuição do autor, 2020).

A área nordeste dos painéis 1 e 2 terão uma vazão conjunta inicial de  $78 \text{ m}^3/\text{s}$  com instalação de portas, e  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  sem uso de portas, para ambos sem considerar perdas no circuito, conforme Figura 3.28. Com a redução da velocidade em virtude

da inversão do fluxo, pode ocasionar aumento de temperatura em locais de acesso de 26,2 °C para 27,5 °C (VUMA).

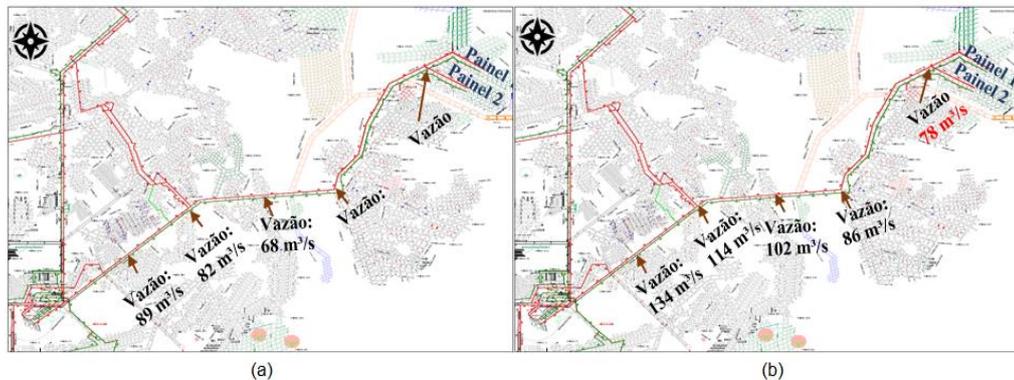


Figura 3.28- (a) vazão atual ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) para os painéis 1 e 2, (b) vazão simulada para os painéis 1 e 2. (Contribuição do autor, 2020).

A Tabela 3.14, demonstra que com a utilização de direcionadores de fluxo de ar e portas, haverá uma equalização do circuito de ventilação adotando também como importante a redução das perdas de ar no circuito.

Tabela 3.14- Simulação de vazão antes do regulador e depois do regulador.

(Contribuição do autor, 2020).

**Vazão: (com regulador e portas)**

Painel	Área	Vazão Medida ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )	Vazão Necessária ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )	Diferença ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
1	NE	42	26	+16
2	NE	36	24	+12
3	N	53	33	+20
4	N	43	23	+20
5	S	46	38	+8
6	S	64	45	+19
<b>Total</b>		<b>284</b>	<b>189</b>	<b>+95</b>

Através do uso da simulação fica-se verificado que:

✓ Área nordeste: atualmente sem regulador de ar, os painéis (1 e 2) não conseguem suprir os valores mínimos de vazão requeridos para manutenção da temperatura admissível.

✓ Área norte e sul: painéis sem problemas atrelados a vazão mínima requerida antes da simulação, e com a simulação atenderia aos parâmetros admissíveis pela NR 15.

### 3.9 Análise do sistema de refrigeração

O sistema de refrigeração é essencial para a continuidade das operações dentro da mina no que se refere a manter as condições de temperatura e conforto térmico para as operações. Devido à grande extensão das frentes de lavra, as trocas de calor do aduzido com a rocha virgem são altas, ocorrendo a elevação da temperatura do ar e reduzindo o conforto térmico dos trabalhadores, desta maneira; o sistema de refrigeração é essencial para a manutenção do circuito de ventilação principal da mina.

As instalações de equipamentos de refrigeração em subsolo têm a vantagem de não estarem sujeitos às condições ambientais variáveis em superfície, sendo as condições em subsolo relativamente estáveis. A mina possui duas câmaras de resfriamento instalados no subsolo denominadas NSC e CSC, juntamente com um ventilador central denominado NEUS e poço de vento denominado SSC.

Uma das formas de avaliação de temperatura se está ou não condizente com o dimensionamento do circuito de ventilação é medir as temperaturas de saída (°C) do sistema de refrigeração, pois a elevação dessa temperatura poderá ser um fator direto ao aumento de temperatura nas frentes de lavra. Desta forma pela Figura 3.29, avaliou-se as medições de temperatura em 2019, do sistema de refrigeração da mina, a fim de avaliar se as temperaturas estão condizentes com as temperaturas planejadas.

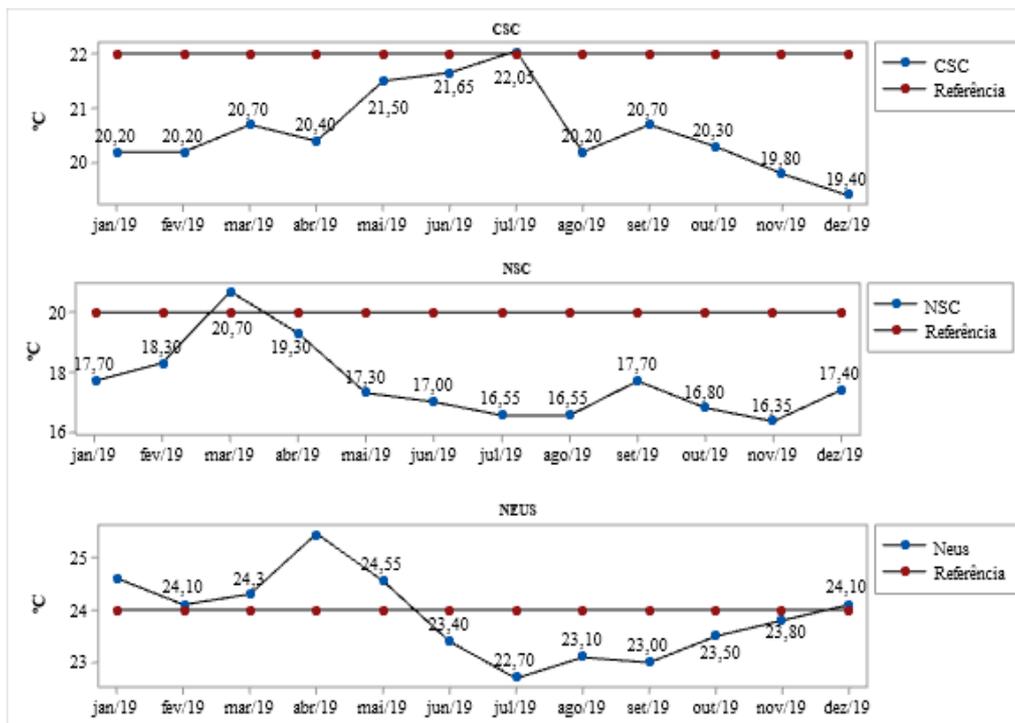


Figura 3.29- Temperaturas médias do sistema de refrigeração e ventilação da mina. (Contribuição do autor, 2020).

Baseando-se nas temperaturas médias analisa-se que:

- ✓ Ventilador Neus: Temperatura média anual de 23,8 °C na saída de medição. Planejado  $\leq 24,0$  °C (- 0,83 %).
- ✓ Ventilador CSC: Temperatura média anual de 17,4 °C na saída de medição. Planejado  $\leq 20,0$  °C (-13,0 %).
- ✓ Ventilador NSC: Temperatura média anual de 20,6 °C na saída de medição. Planejado  $\leq 22,0$  °C (-6,4 %).

Decorre pelas médias apresentadas em 2019, as temperaturas encontram-se dentro na média planejada ao circuito de refrigeração. Através das temperaturas médias dos painéis 1 e 2, foi verificado se as temperaturas do sistema de refrigeração estão correlacionadas ao aumento da temperatura nos painéis de lavra, demonstradas através das Figura 3.30 e 3.31.

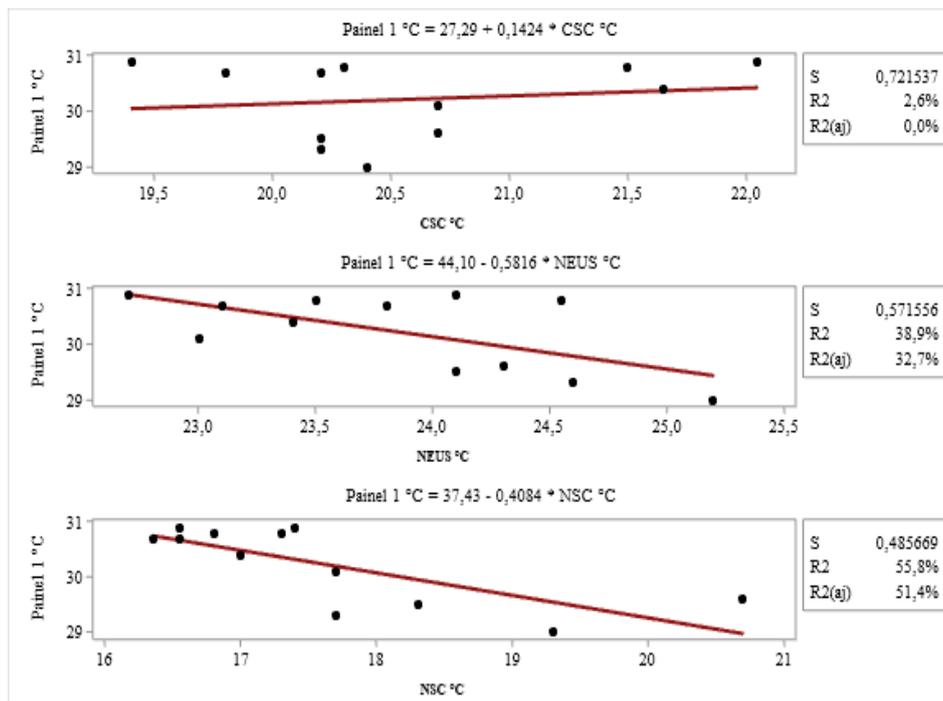


Figura 3.30- Correlação entre a temperatura de refrigeração x temperatura do painel 1. (Contribuição do autor, 2020).

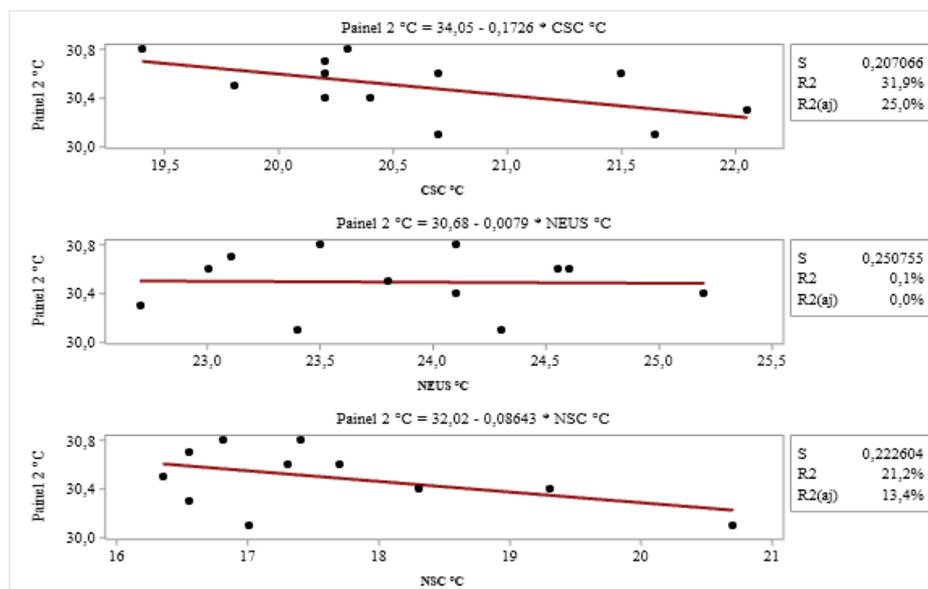


Figura 3.31- Correlação entre a temperatura de refrigeração x temperatura do painel 2. (Contribuição do autor, 2020).

Mediante o gráfico de correlação, fica compreendido que para o aumento das temperaturas nos painéis de lavra 1 e 2, não há demonstrado o efeito do sistema de

refrigeração para o aumento de temperatura nos painéis. Todavia através da Figura 3.32, revela uma tendência ao aumento da temperatura do sistema para os Neus e para o NSC, devendo ser ponto de atenção para os próximos meses.

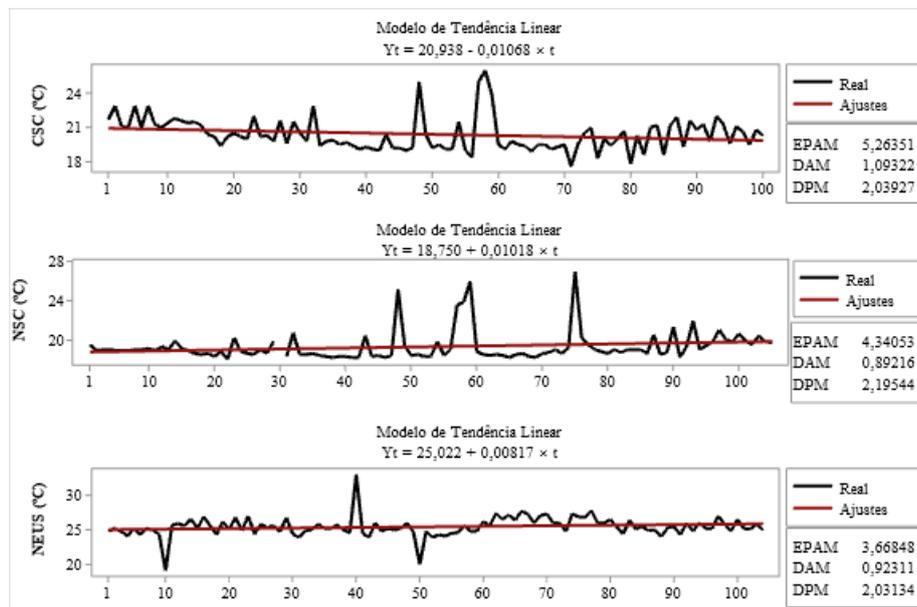


Figura 3.32- Tendência de temperatura relacionado ao sistema de refrigeração. (Contribuição do autor, 2020).

### 3.10 Uso de tapumes: correias x lona

Uma das formas de garantir de forma efetiva o controle final do sistema de ventilação é a regulagem e redirecionamento do fluxo de ar para os locais de maior demanda. Como parte destes elementos, geralmente em mina subterrânea o uso de tapumes em minas subterrâneas é um dos mais utilizados, para garantir menores perdas de vazão e direcionador de ar para as frentes de lavra.

Há diversos tipos destes direcionadores no mercado, sendo os principais: tapumes de lonas, tapumes de correias, pontes de desvio de ar, muros de concreto/tijolo, sendo este último, geralmente de maior custo, com maior tempo de instalação, entretanto menor tempo de ações corretivas. Na mina em estudo são utilizados essencialmente dois tipos de reguladores de fluxo que são: tapumes de correia e tapumes de lona, conforme mostrado na Figura 3.33.



Figura 3.33- (a) tapume de correia com *poliurethano*, (b) tapume de lona sem vedação. (Contribuição do autor, 2020).

Foram avaliados os tapumes de correia e tapumes de lona, em uma das rampas principais da mina, principalmente relacionada às questões das perdas de ar, sendo verificadas as seguintes situações e ilustradas na Figura 3.34.



Figura 3.34- Problemas operacionais identificados no tapume de lonas em mina subterrânea. (Contribuição do autor, 2020).

Os principais ganhos operacionais qualitativos da substituição dos tapumes de lona por correia, podem ser as seguintes:

- ✓ Maior vedação/contato dos tapumes de correias pelos de lona.

- ✓ Menor desgaste dos tapumes de correia, em relação aos de lona, relacionado ao tempo em campo.
- ✓ Maior perda/rasgo de tapume de lona em locais de deslocamento de rocha.
- ✓ Maior número de corretivas em tapumes de lonas.

Após verificação e análise visual dos tipos de direcionadores existentes na mina, foi feita a verificação quantitativa das perdas de ar em 14 pontos direcionados aos painéis 1 e 2 relacionados aos tapumes de correia e tapumes de lona, sendo demonstrados na Figura 3.35.

### Teste T Pareado e IC: Tapume Correia; Tapume Lona

#### Estatísticas Descritivas

Amostra	N	Média	DesvPad	EP Média
Tapume Correia	14	1,436	0,725	0,194
Tapume Lona	14	2,964	1,028	0,275

#### Estimativa da diferença pareada

Média	DesvPad	EP Média	IC de 95% da diferença_μ
-1,529	0,874	0,234	(-2,033; -1,024)

*diferença\_μ: média de (Tapume Correia - Tapume Lona)*

#### Teste

Hipótese nula  $H_0$ : diferença\_μ = 0  
 Hipótese alternativa  $H_1$ : diferença\_μ ≠ 0

Valor-T	Valor-p
-6,54	0,000

Figura 3.35- Análise estatísticas das perdas de ar com tapume de correia e tapume de lona. (Contribuição do autor, 2020).

Os dados do resultado do tapume de correia são significativamente melhores que os tapumes de lona. Os valores de IC (-2,0 a -1,0), significam que o tapume de correia possui perdas de ar ( $m^3/s$ ) menores que os tapumes de lona. Os tapumes de correia possuem uma perda média de  $1,5 m^3/s$ , e o tapume com lona possui perda de até  $3,0 m^3/s$ . A Figura 3.36 exibe a avaliação estatística aplicada destas perdas.



circuito de ar (paralelo ou série).

Foi verificado que em um dos pontos principais da mina na rampa de acesso próximo ao ventilador principal, há uma quantidade considerável de equipamentos, que torna a uma maior resistência/obstrução do acesso e conseqüentemente pode haver redução da velocidade do ar o que pode estar diretamente relacionado à vazão, conforme Figura 3.37.

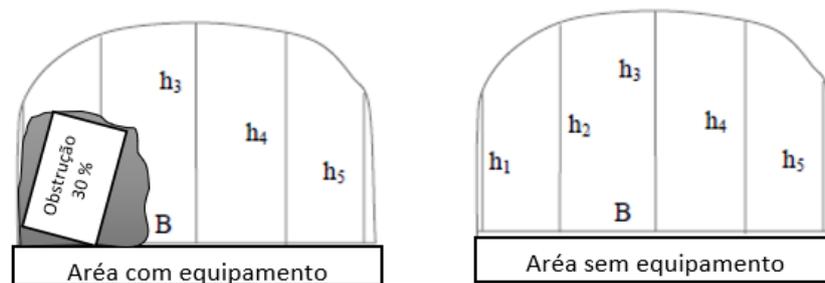


Figura 3.37- Modelo esquemático de obstrução da rampa de acesso, em virtude de equipamentos. (Contribuição do autor, 2020).

Desta forma foram coletadas as vazões em um dos pontos denominado ponto A2, para análise e posterior plano de ação, se com a retirada dos equipamentos poderia influenciar a uma maior velocidade de ar e conseqüentemente maior vazão, dos pontos com resistência de passagem, conforme dados quantitativos da Figura 3.38.

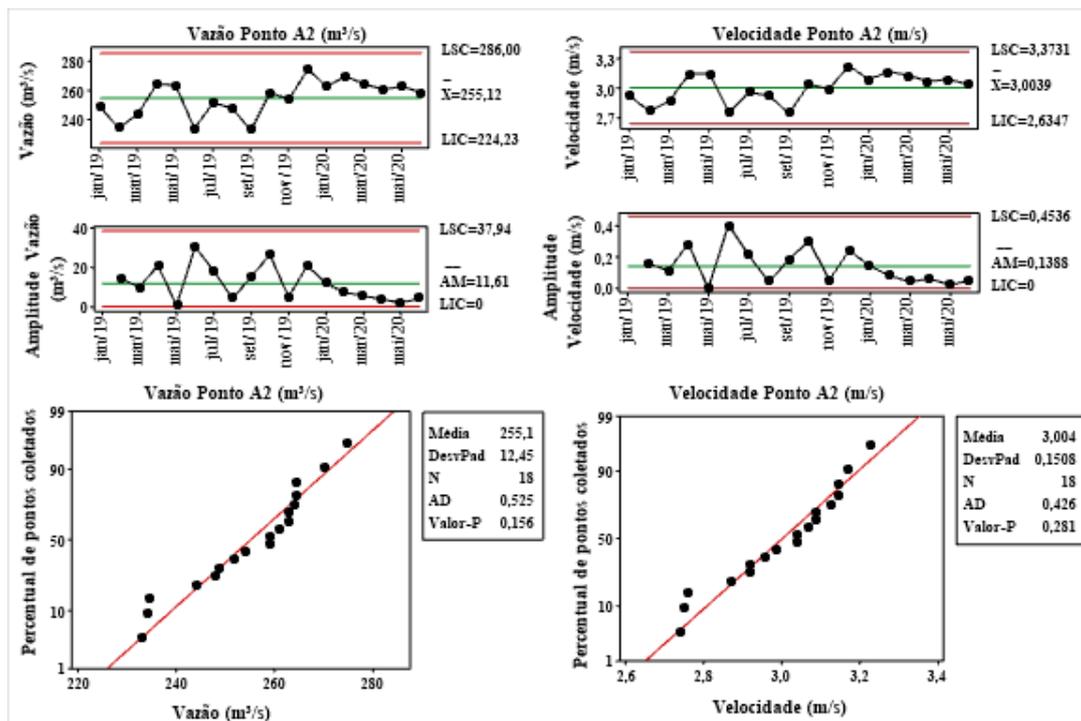


Figura 3.38- Análise da velocidade e vazão de ar no ponto A2. (Contribuição do autor, 2020).

### 3.12 Plano de ação

Segundo a metodologia DMAIC, foi realizado um plano de ação descritas na Tabela 3.15. Este plano de ação será executado com cinco ações sequenciadas escolhidas anteriormente pela matriz de priorização sendo escolhidas. Todas as cinco causas serão provadas numericamente e/ou modo qualitativo, como comprovação do plano de ação a ser aplicado.

Tabela 3.15- Plano de ações para redução de horas paradas por ventilação.  
(Contribuição do autor, 2020).

<i>What</i> O Quê	<i>Why</i> Porque	<i>How</i> Como	<i>How Much</i> Quanto	<i>Where</i> Onde	<i>When</i> Quando
Baixa análise de perdas de ar (vazão)	Baixa simulação de perdas de ar na mina, e otimização de circuito.	Simulação com uso de software VUMA	R\$0	Rampa Principal (RN2)/Painel 1 e 2	20/02/2020
Limpeza de galerias de exaustão	Reduzir recirculação de ar (limpo e contaminante)	Limpeza com uso de LHD	R\$0	Eixo 01/RN2	02/07/2020
Falta de medição entre pontos isolados de perdas	Baixo conhecimento nos locais (travessas, cortinas, portas) de maiores perdas	Análise de perdas de ar do sistema de ventilação até os painéis 1 e 2.	R\$0	Rampa Principal (RN2)/Painel 1 e 2	27/04/2020
Baixo rigor em substituição e avaliação de dutos	Não há avaliação técnica e de inspeção para troca de duto	Realização de procedimento operacional, para análise, manutenção e troca de dutos.	R\$0	Rampa Principal (RN2)/Painel 1 e 2	28/05/2020
Acessos de equipamentos em rampas de ventilação	Equipamentos estacionados em rampas, reduzem a velocidade do ar para as frentes de lavra	Retirada dos equipamentos da rampa principal, para estacionamento a ser criado na mina.	R\$0	Rampa Principal (RN2)	02/05/2020
Alto Desgaste de cortina	Grande número de cortinas com avarias e não trocadas.	Substituição de cortinas desgastadas	R\$0	Rampa Principal (RN2)	10/07/2020
Aumento do conforto térmico	Melhorar sensação térmica e desconforto	Testes com climatizador local	R\$ 19900 (protótipo já existente)	Sondagem	01/09/2020

### 3.13 Redistribuição da vazão de ar

A ação da redistribuição do ar será baseada na simulação realizada através do software VUMA, com uso aplicação e instalação de portas e reguladores conforme Figura 3.39, visando suprimir a necessidade de ar nos painéis denominados 1 e 2.



(a)

(b)

Figura 3.39- (a) sem regulador de ar; (b) aplicação de regulador e portas para redistribuição de ar. (Contribuição do autor, 2020).

A instalação das portas e reguladores foi realizada durante o período de 25/03/20 à 27/03/20, e coletadas as vazões e temperaturas após o período de instalação, durante o período de 01/04/20 à 30/06/20, conforme ilustrada nas Figuras 3.40 e 3.41.

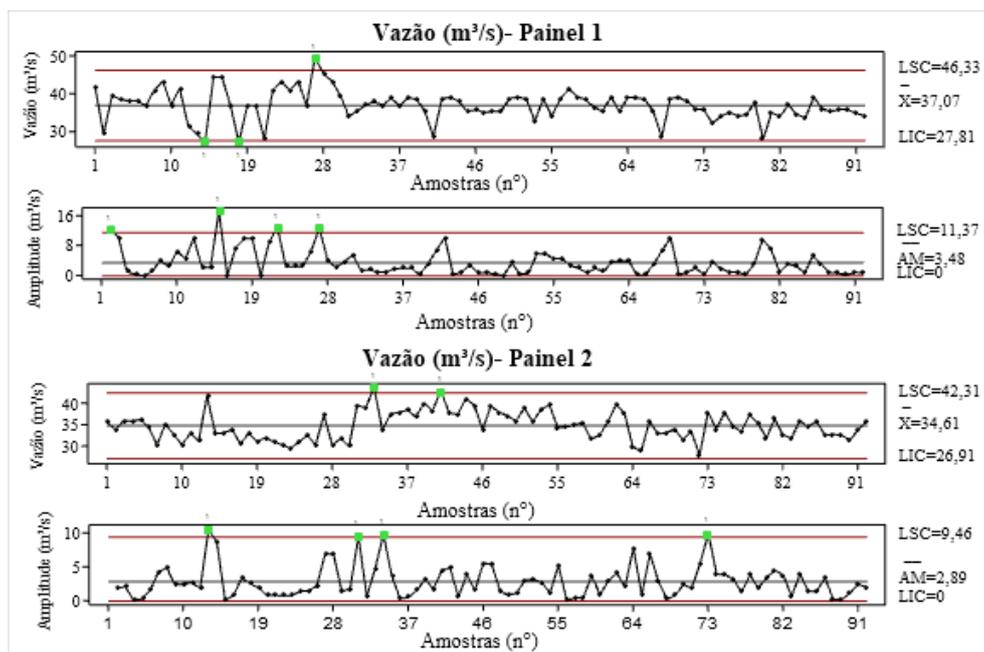


Figura 3.40- Carta de controle para vazão de ar referente aos painéis 1 e 2, após a instalação de portas e reguladores. (Contribuição do autor, 2020).

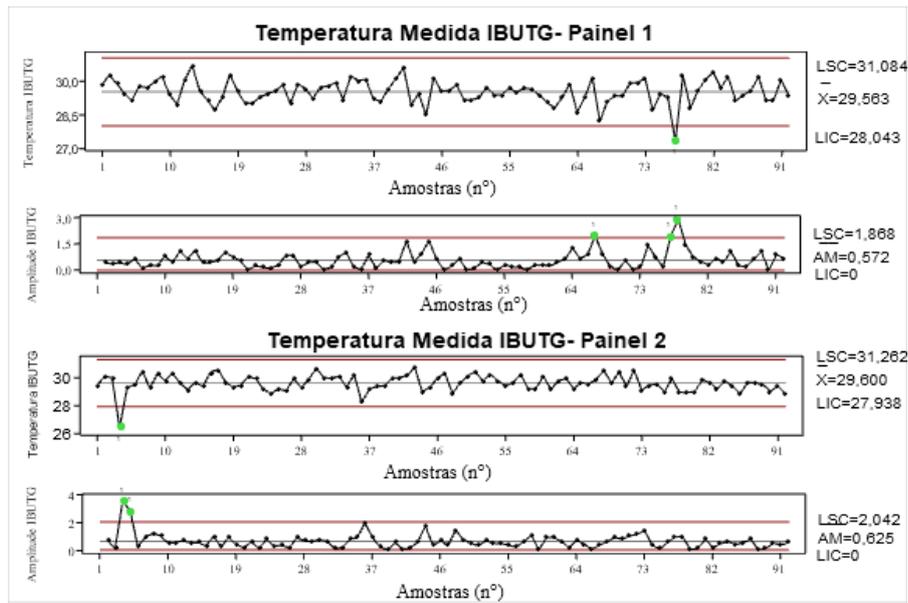


Figura 3.41- Carta de controle para temperatura, referente aos painéis 1 e 2, após a instalação de portas e reguladores. (Contribuição do autor, 2020).

Com a instalação do regulador para distribuição e equalização do circuito, foram comparadas as temperaturas e vazões dos painéis 1 e 2 referentes à: média de 2019 sem uso de portas e reguladores, média 2020 com uso de portas e reguladores (após sua instalação) e valores simulados com uso do software de ventilação de mina, mostradas pela Figura 3.42 e 3.43.

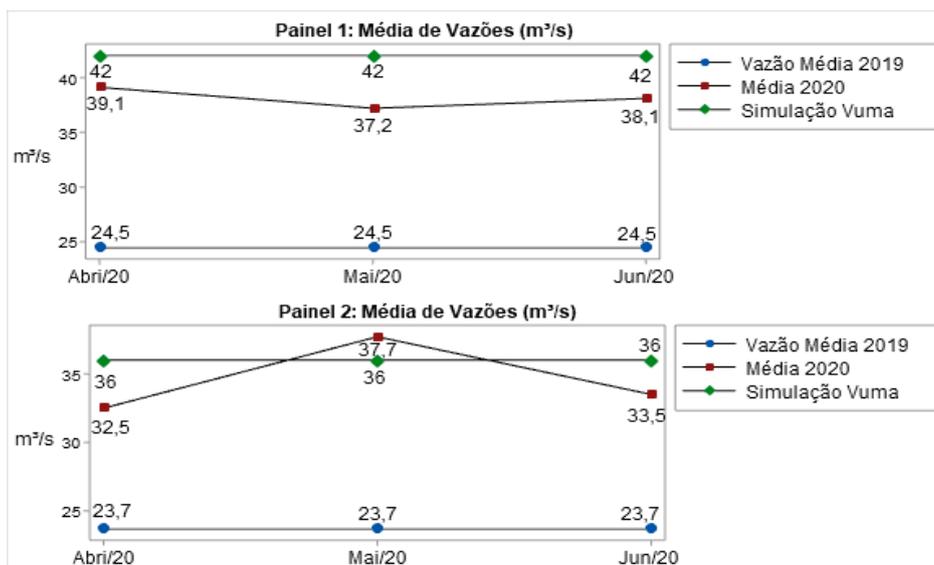


Figura 3.42- Comparativo das vazões médias de 2019, 2020 e simulada, referente aos painéis 1 e 2. (Contribuição do autor, 2020).

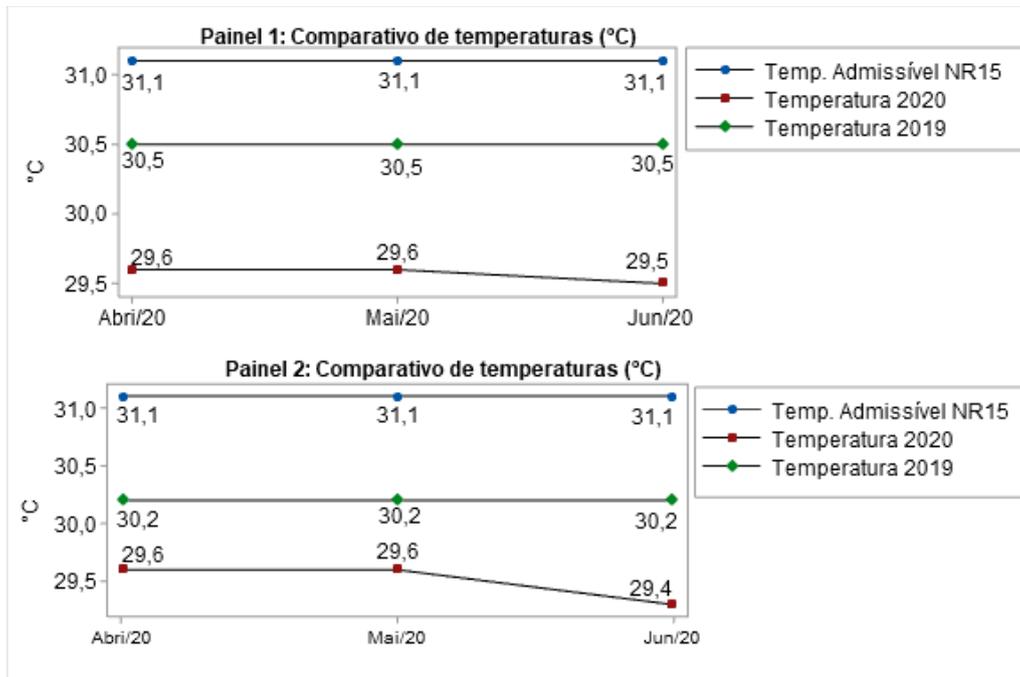


Figura 3.43- Comparativo das temperaturas médias de 2019, 2020 e simulada, referente aos painéis 1 e 2. (Contribuição do autor, 2020).

### 3.14 Redução das perdas de ar

As perdas de ar da mina estão com perdas admissíveis acima de 25 % e especificamente para os painéis 1 e 2 de 36,1 e 32,0 %, sendo necessário a compreensão destes desvios, para a proposta de ações corretivas e melhoria do circuito de ventilação. Foram identificadas que as maiores falhas estão atreladas à: fuga de ar pelas portas de acesso, perdas de ar nas cortinas e tapumes de correia, abertura de piso causando perdas de ar em fendas, a Figura 3.44 mostra as perdas de ar neste trecho médio.

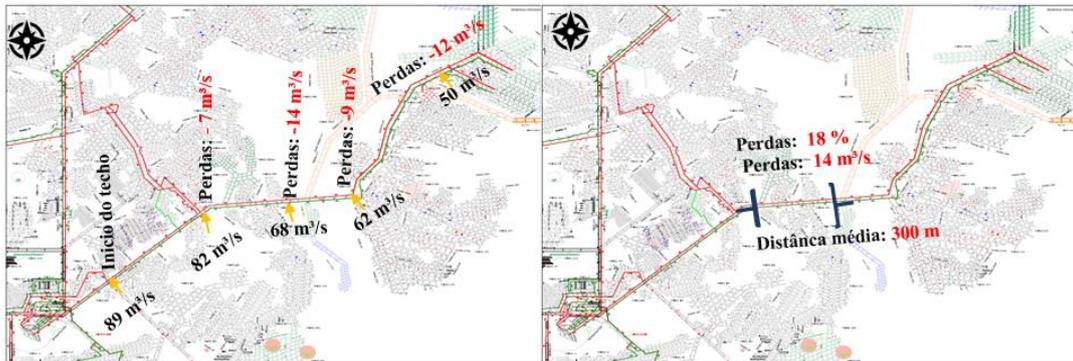


Figura 3.44- Perdas de ar da mina em um dos acessos de lavra. (Contribuição do autor, 2020).

Como forma de reduzir as perdas de ar no circuito, foram aplicadas vedações nas portas do circuito de ventilação, conforme Figura 3.45.



Figura 3.45- (a) perdas de ar entre portas; (b) aplicação de vedação em portas de acessos para redução de fugas de ar. (Contribuição do autor, 2020).

Outro fator que causa perda de ar no circuito, é referente a baixa qualidade das vedações em cortinas de lona e/ou substituição por cortinas de correia com uso de *poliurethano* (material selante fixador). Foi realizada a vedação nas cortinas do circuito estudado, para avaliar a redução das perdas, conforme Figura 3.46.



Figura 3.46- (a) cortinas sem vedação nas laterais da galeria; (b) cortinas com vedação nas bordas da galeria. (Contribuição do autor, 2020).

Após as tratativas e corretivas nesta parte do circuito foram realizadas medições para confirmar se as ações causaram reações positivas ao circuito, conforme Figura 3.47.

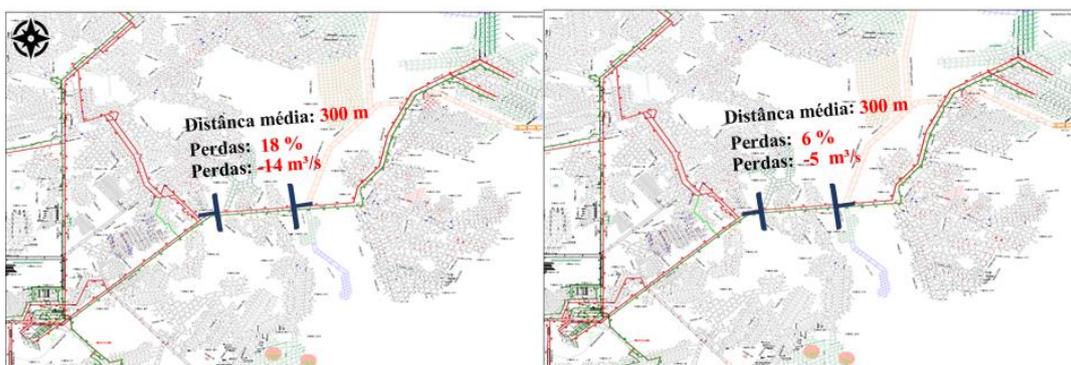


Figura 3.47- (a) perdas de ar no trecho antes das melhorias; (b) perdas de ar no trecho após as melhorias. (Contribuição do autor, 2020).

Foram verificados que as ações de redução de perdas reduziram em cerca de 67,7 % (ganho de 11 m³/s de vazão), na qual trabalhando-se o circuito em sua otimização a vazão de ar nas frentes de lavra podem se tornar ainda melhores, e evitar qualquer outro tipo de interrupção de parada por efeito de temperatura acima da especificada pela NR 15.

### 3.15 Desobstrução de galerias de retorno

As galerias de retorno de ventilação servem para transportar o ar contaminado das frentes de lavra e acesso para fora do ambiente subterrâneo, além destas vias evitarem a contaminação do ar fresco com ar contaminado. Foram vistos que há diversos pontos na mina, com acúmulo de material que obstrui a passagem de ar, o que pode ocasionar: redução da velocidade do material carreado, transferência de material para as galerias próximas pela barreira e possível recirculação de ar nestas vias. Desta forma como forma qualitativa, foram realizadas desobstrução em acessos de retorno de exaustão, a fim de melhorar o fluxo de saída do ar contaminado na mina, conforme Figura 3.48.



Figura 3.47- (a) e (b) galeria de retorno obstruída; (c) desobstrução da galeria de retorno. (Contribuição do autor, 2020).

### 3.16 Teste de climatização

Foram coletadas as medições de temperatura IBTUG (°C) e analisadas os valores de temperatura pelo período de 01/03/20 a 30/09/20 em determinada área da mina denominada sonda K, obedecendo à premissa de vazão constante próxima de 22 m<sup>3</sup>/s neste local. A escolha da sondagem para testes, deve-se às condições de menor mobilização de equipamentos para prover maior agilidade aos testes. A Figura 3.49 e Tabela 3.16, demonstram esses valores para o período considerado.

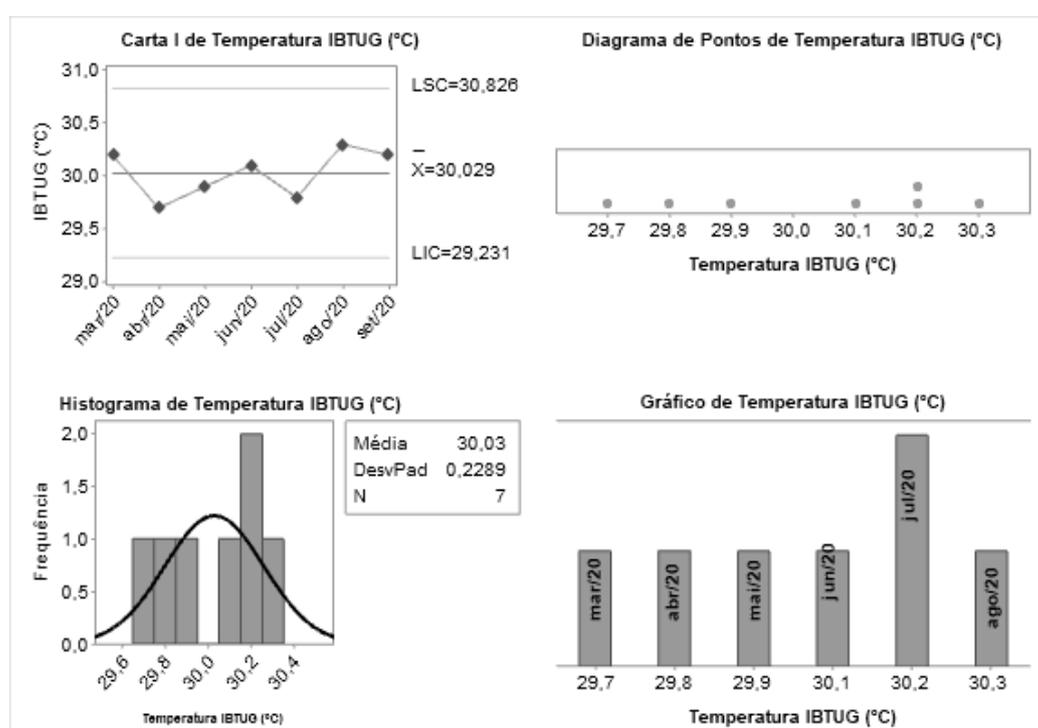


Figura 3.49- Estatística da temperatura antes do teste do climatizador.

(Contribuição do autor, 2020).

Tabela 3.16 - Plano de ações para redução de horas paradas por ventilação.

(Contribuição do autor, 2020).

Variável	Média	Desv. Pad.	Variância	Mínimo	Máximo	Amplitude
Temperatura IBTUG (°C)	30,03	0,23	0,05	29,7	30,3	0,6

As coletas realizadas mostram que a temperatura média foi de 30 °C,

estando abaixo da NR 15, na qual preconiza trabalhos inferiores a 31,1 °C. Através de um protótipo já disponível na mina, foi consolidado a instalação de um climatizador móvel, no qual estaria acoplado ao sistema de ventilação secundário. O princípio de funcionamento se baseia na troca do resfriamento evaporático, no qual o próprio ar cede calor sensível para a água umidificar.

A instalação do climatizador para a sua devida confirmação de eficácia deve ser levado como pontos principais: a redução da temperatura nominal e manutenção dos parâmetros anteriores do local de trabalho, como por exemplo estabilidade do maciço e minimização de deslocamento de rocha em virtude da presença de água.

A instalação foi realizada no dia 01/10/20, em uma das áreas da sondagem/exploração, devido a menores deslocamentos do protótipo, que poderiam ter em virtude da movimentação dos ventiladores nas frentes de lavra, conforme Figura 3.50 e 3.51.

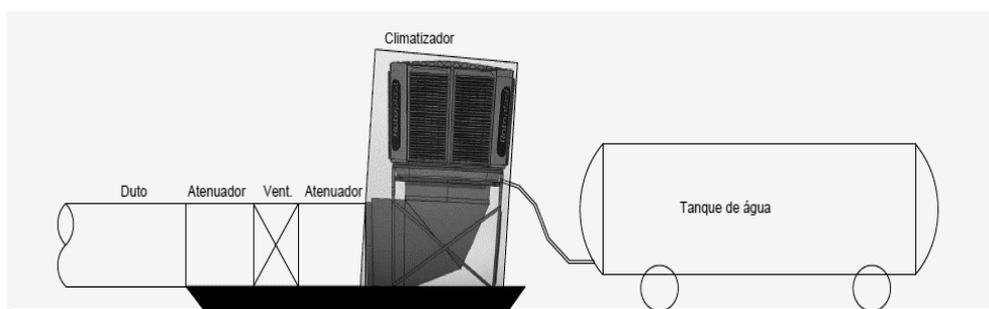


Figura 3.50- Protótipo de climatizador móvel. (Contribuição do autor, 2020).



Figura 3.51- Instalação do climatizador acoplado ao ventilador secundário.  
(Contribuição do autor, 2020).

Após a instalação do climatizador foram realizadas as coletas de medição de temperatura com uso de um psicrômetro, mantendo sempre a continuidade operacional do teste, para a estabilização da temperatura no ambiente com o climatizador, dutos de ventilação, grau geotérmico da rocha, equipamentos. A Figura 3.52 mostra os dados coletados de temperatura durante o período, e a Tabela 3.17 as médias encontradas.

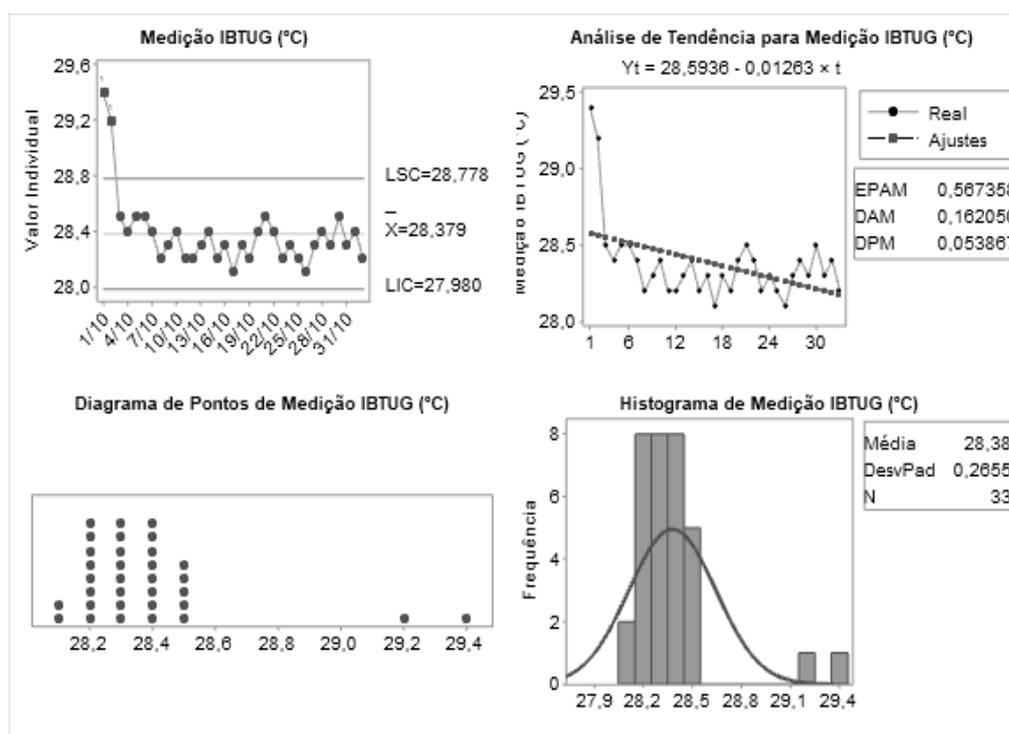


Figura 3.52- Estatística da temperatura após do teste do climatizador.  
(Contribuição do autor, 2020).

Tabela 3.17- Estatística das temperaturas após o teste dos climatizador.  
(Contribuição do autor, 2020).

Variável	Média	Desv. Pad.	Variância	Mínimo	Máximo	Amplitude
Temperatura IBTUG (°C)	28,4	0,27	0,35	28,1	29,4	1,3

Verifica-se que o uso do climatizador resultou em redução da temperatura média em  $-1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , uma redução percentual de  $-5,33\%$  na temperatura antes dos testes. A partir do gráfico desenvolvido por Poulton em 1970 em função da média

da temperatura o rendimento do operador estaria em 90 % antes do uso e 96 % após o uso do climatizador, conforme Figura 3.53.

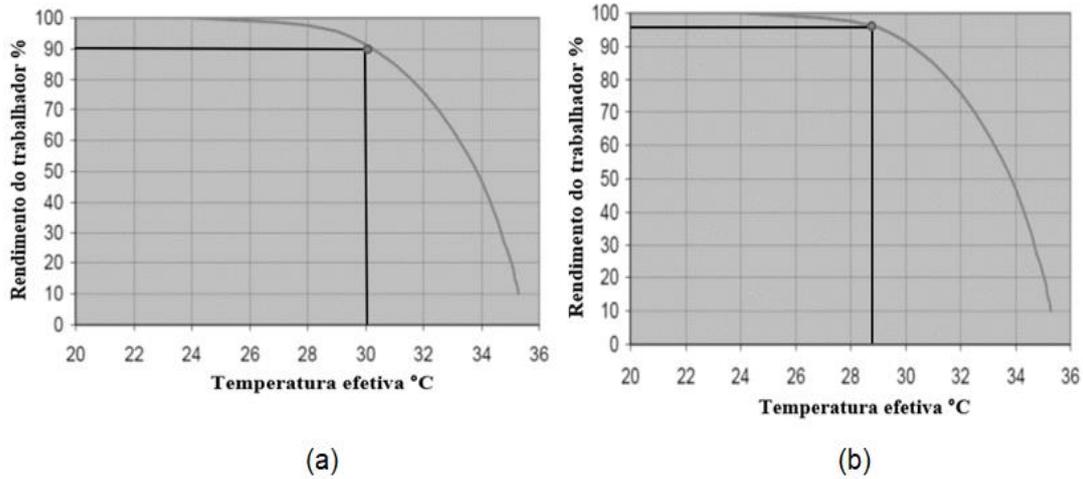


Figura 3.53- (a) rendimento do trabalhador antes do climatizador; (b) rendimento do trabalhador após uso do climatizador. (Adptado Poulton, 1970)

A análise qualitativa sobre a sensação e conforto térmico da temperatura junto aos envolvidos na operação, foi realizada antes e depois dos testes. Para o questionário antes do teste, foram computados 2.000 votos, 37 funcionários, por 4 turnos ininterruptos, sendo analisados pela Figura 3.54.

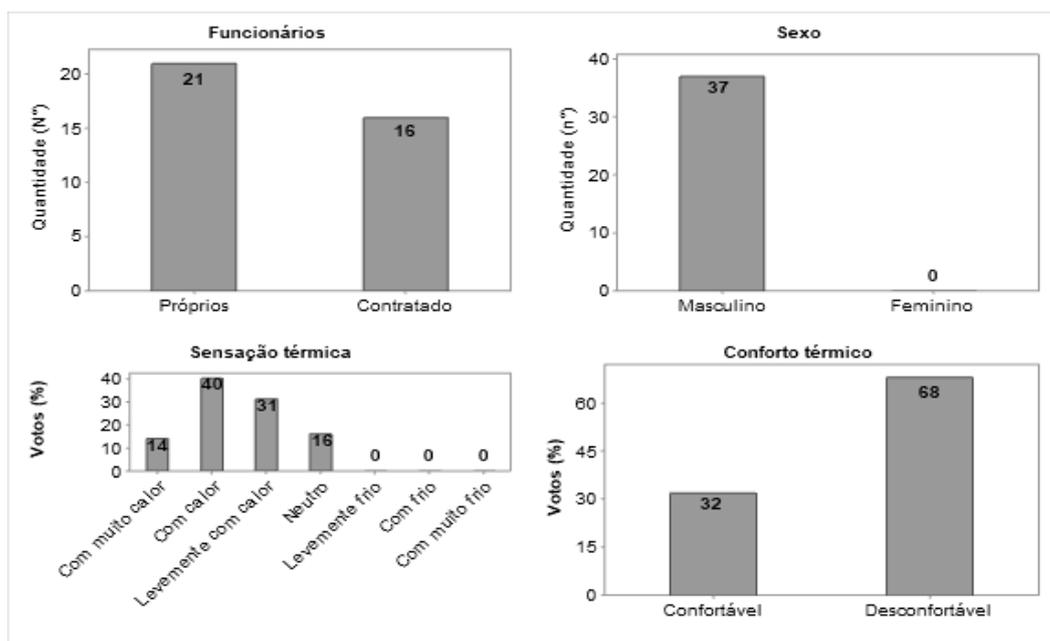


Figura 3.54- Questionário sobre sensação térmica na mina, antes dos testes com climatizador. (Contribuição do autor, 2020).

Pelo gráfico observa-se que a sensação de calor (com muito calor, com calor e levemente com calor) está em 84 %, e o conforto térmico como desconfortável em 68 %, às atividades habituais desempenhadas pela sondagem.

Com os testes em curso foram realizados 1.625 votos de pesquisa, com 37 funcionários, em 4 turnos ininterruptos durante os testes com climatizadores. Pelo gráfico observa-se que a sensação de calor (com muito calor, com calor e levemente com calor) está em 43 %, e o conforto térmico em 16 % como desconfortável às atividades habituais desempenhadas pela sondagem, observado pela Figura 3.55.

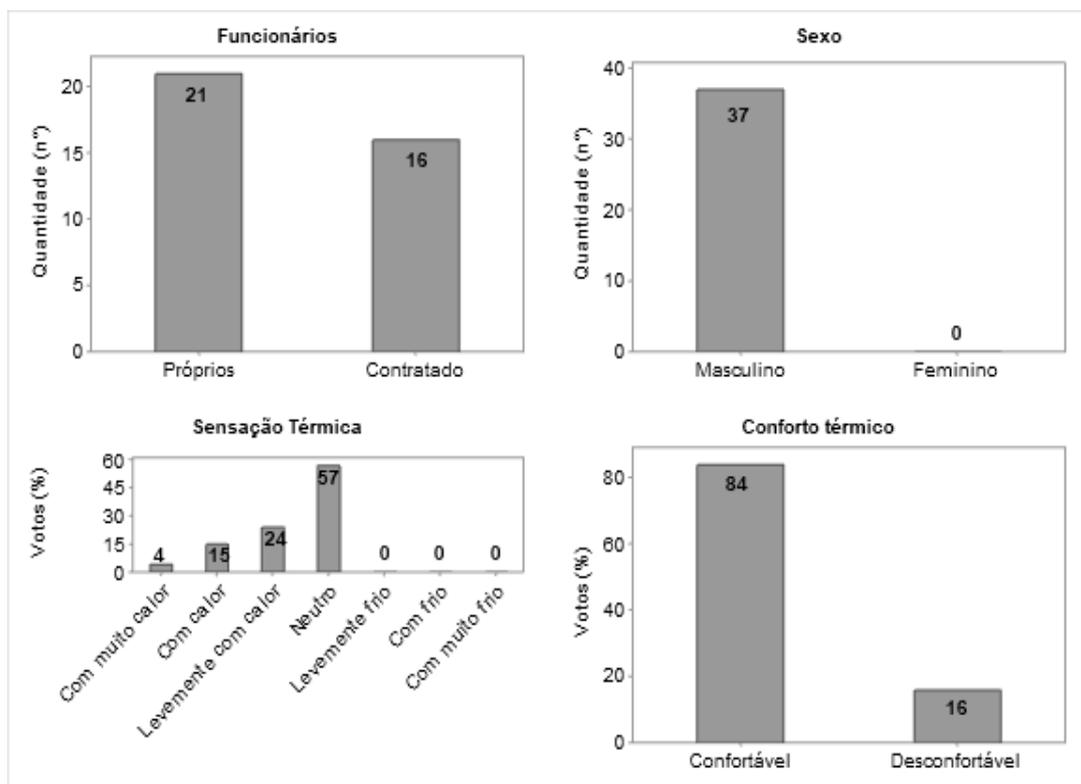


Figura 3.55- Questionário sobre sensação térmica na mina, durante testes com climatizador. (Contribuição do autor, 2020).

Nota-se uma melhora significativa da sensação térmica de neutro em +41 %, e o conforto térmico uma melhoria percentual de + 62 %, em relação ao questionário qualitativo com o uso dos climatizadores.

#### 4. RETORNO FINANCEIRO

Com a temperatura nos painéis de lavra 1 e 2 abaixo dos limites admissíveis pela NR 15, foi comparado as paradas das frentes de lavra no período de abril a junho de 2019 e 2020, contemplando todos os locais de lavra. É demonstrado o efeito positivo na instalação de reguladores e portas, obtendo redução de -87 % no tempo total de paradas por temperatura, conforme Figura 3.56. Das 21 horas paradas estas foram atreladas a parada da ventilação primária por queda de energia elétrica, porém impactando diretamente o painel por temperatura.



Figura 3.56- Comparativo do número de horas paradas de painéis de lavra, por temperatura durante o trimestre de 2019 e 2020. (Contribuição do autor, 2020).

Com a redução do número de horas paradas do painel de lavra por temperatura, foi realizado uma análise financeira, comparando o trimestre de abril a junho de 2019 e 2020, demonstrando um retorno financeiro estimado de R\$ 1.164.000, pela maior disponibilidade de horas para a operação de lavra, visualizado pela Figura 3.56.

MEMÓRIA DE CÁLCULO DO RETORNO					
Descrição		Unidade	abr/20	mai/20	jun/20
Sem Iniciativa	Horas em paradas do painel	h	43	52	71
Com iniciativa	Horas em paradas do painel	h	11	16	9
Resultados Financeiros:					
Item		Unidade	abr/20	mai/20	jun/20
Sem iniciativa	Receita Total	R\$ mil	46.871	46.871	46.871
Com iniciativa	Receita Total	R\$ mil	47.157	47.196	47.425
Resultado	Δ Receita	R\$ mil	286	325	553
	Δ Custo	R\$ mil	0	0	0

Figura 3.56- Cálculo financeiro de retorno com redução do número de horas paradas por temperatura em painéis de lavra. (Contribuição do autor, 2020).

## 5. CONCLUSÕES

Através da análise do indicador de performance, a utilização (%) em 2019 representou o maior percentual de perdas do ROM com perdas percentuais estimadas na massa desmontada em 79 %. Através da análise de perdas por paradas não planejadas, a ventilação de mina representou impacto 639 horas/ano na disponibilidade de horas a serem utilizadas no processo de operação de lavra. Estas horas resultaram em perdas produtivas de 22.596 t de ROM em 2019, equivalente a R\$ 5.120.000 por venda do produto comercializado, sendo importante a criação de ações em curto espaço de tempo e alto impacto, para redução de paradas na operação de lavra, minimizando os desperdícios de horas paradas disponíveis, com os preceitos do *Lean Manufacturing*.

A análise realizada da oferta e demanda do fluxo de ar para os painéis de lavra, atestou que a mina não se atentou para um dos princípios *Lean* (o desperdício), representado neste caso pela vazão de ar, na qual confirma que o atual circuito de ventilação não atende aos requisitos de vazão mínima em dois painéis de lavra, e há desperdícios associados ao *Lean Manufacturing*, como por exemplo: processamento inadequado/impróprio e defeitos (perdas de ar por fuga).

A análise de dados relacionados ao circuito de ventilação em 2019, demonstra

que o valor da vazão total mínima para não ocorrer paradas por temperaturas nos painéis 1 e 2 acima da admissível pela NR 15 é de 50 m<sup>3</sup>/s, e valores medidos em campo indicam uma vazão conjunta de 41 m<sup>3</sup>/s, tornando insuficiente a vazão de ar para estes locais. As perdas atuais do circuito por fugas/perdas de ar estavam acima de 30 %, necessitando de ações corretivas para melhoria contínua do sistema de ventilação da mina.

A simulação com uso do *software* VUMA, demonstrou uma equalização da vazão de ar nos seis painéis de lavra, com uso de reguladores e portas, no qual haverá uma disponibilidade de ar em torno de 42 m<sup>3</sup>/s e 36 m<sup>3</sup>/s para os painéis 1 e 2, totalizando 78 m<sup>3</sup>/s. Os valores medidos em campo no período de abril a junho de 2020 após a instalação do regulador, esteve em 38 m<sup>3</sup>/s e de 33 m<sup>3</sup>/s para os painéis de lavra 1 e 2 com vazão conjunta de 71 m<sup>3</sup>/s, significando uma aderência de 91 % entre os dados medidos em campo e simulados.

Nota-se um efeito positivo com a instalação dos reguladores na mina, com uma melhor redistribuição da vazão de ar e manutenção da temperatura °C admissível nas frentes de lavra, obtendo como resultado menores interrupções nas atividades de operação de lavra pelo efeito de aumento de temperatura. Com a instalação das portas e regulador de fluxo de vazão de ar, foi verificado que mantendo os parâmetros e perdas do circuito de ventilação em 2019, a temperatura média no período de abril a junho/20 foi de 29,5 e 29,6 °C, respectivamente nos painéis 1 e 2, gerando uma redução de -0,6 °C e -0,9 °C para temperatura nas frentes de lavra em relação ao mesmo trimestre de 2019 nestes dois painéis de lavra.

Foi verificado que o uso de climatizadores móveis em uma determinada área da mina resultou em redução média de 1,6°C (-5,33 %) na frente de serviço considerando o mesmo *layout*, vazão e equipamentos. A partir do gráfico desenvolvido por Poulton,1970, em função da média da temperatura o rendimento do operador estaria em 90 % antes do uso, e 96 % após o uso do climatizador, que gera melhoria na frente de serviço utilizado.

Face às pesquisas qualitativas realizadas, foi verificado uma melhoria da sensação térmica considerada como calor (com muito calor, com calor e levemente com calor) de 84 % para 43 % em relação aos votos percentuais, e o conforto térmico considerado como desconfortável de 68 % para 16 % em relação aos votos

percentuais, o que reforça a análise quantitativa dos testes.

O estudo traz como uma das possibilidades confirmadas: incremento e melhoria de frentes de serviço relacionado à temperatura (sondagem e/ou frentes de lavra), tendência a uma maior jornada de trabalho atendendo à NR 15, e viabilidade operacional de exploração em áreas com temperaturas próximas ao limite admissível, podendo ser uma fonte de melhoria para redução de temperatura em frentes de lavra e sondagem.

A temperatura dentro dos limites admissíveis durante o período de abril a junho/20, representa -78 % em horas paradas por ventilação confrontando os anos de 2019 a 2020 durante os meses de abril a junho, podendo gerar incremento de 4.485 t de *ROM*, com receita estimada em R\$ 1.164.000, relacionada às horas disponíveis e utilizadas para operação de lavra.

Para redução das perdas do circuito de ventilação foram feitas melhorias qualitativas a fim minimizar as perdas e fugas de ar. Com este preceito foi otimizado um trecho com grande perda de ar na qual com a otimização foi um incremento de 11 m<sup>3</sup>/s em um trecho de 300 metros de circuito, reduzindo as perdas nestes trechos em 66,7 %, comprovando que as ações de otimização geram ganhos no circuito de ventilação de mina.

Verifica-se que com a redistribuição de ar da mina foi gerado menores interrupções na operação de lavra pelo efeito do aumento da temperatura, o que disponibiliza maior tempo (h) para a operação de lavra. Necessário para o planejamento estratégico para os anos de 2021 e 2022 otimização para redução das perdas e fugas de ar no circuito para otimização e melhoria do circuito.

## APÊNDICE I

# ConBRepro

X Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção -  
Engenharias na Saúde (100% On-line)

## Carta de aceite

Temos a grata satisfação de certificar que o trabalho intitulado **Análise de Indicadores De Produção em Uma Mina Subterrânea** autoria de **ALISSON CARVALHO BRASIL** foi aceite pela Comissão Organizadora do **X Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção - Engenharias na Saúde (100% On-line)** para apresentação e publicação nos Anais do evento, na área temática 5. **ENGENHARIA DA QUALIDADE** e na modalidade **NÃO IREI APRESENTAR NO EVENTO**.



70222949cc0db89ab32c9969754d4758



Prof. Dr. Gilberto Zammar - Presidente da Comissão Científica

Ponta Grossa - PR, 20 de novembro de 2020

Os dados desta certidão são fiéis e autênticos, conforme nossos registros e podem ser verificados no endereço <https://inscricao.aprepro.org.br/index.php/aceite/index/> até a data de realização do evento. Para maiores informações entre em contato com o suporte.



# CERTIFICADO 2020

O trabalho

**Análise de Indicadores De Produção em Uma Mina Subterrânea**

sob autoria de

**ALISSON CARVALHO BRASIL**

foi publicado nos anais do X CONBREPRO.  
Realizado de 02 a 04 de dezembro de 2020.



Prof. Dr. João Luiz Kovaleski  
Presidente da APREPRO

Prof. Dr. Gilberto Zammar  
Presidente da Comissão Científica

9922f5774d88b203c4ec0fd426616899

Os dados desta certidão são fidedignos e autênticos, conforme nossos registros e podem ser verificados no endereço <https://inscricao.aprepro.org.br/index.php/stock/index>.  
Certificado registrado online no dia 10/12/2020. Para maiores informações entre em contato com o suporte.

### Análise de Indicadores De Produção em Uma Mina Subterrânea

Alisson Brasil  
UFMG/CPGEM  
Renan Collantes Candia  
UFMG/DEMIN

**Resumo:** A mineração vem gerando na economia brasileira uma média de 3,1 % no Produto Interno Bruto (PIB) durante o período 2013 a 2018, porém em recessões e cenários cada vez mais competitivos, torna-se essencial analisar gargalos operacionais para aumento da cadeia do fluxo de valor interno, como fator importante à sobrevivência e longevidade das operações. Para todos os processos industriais os indicadores de desempenho constituem uma espécie de bússola, para buscar melhor direcionamento, posicionamento e realinhamento às metas estratégicas corporativas. O artigo pretende disseminar as avaliações de indicadores para todas as indústrias independente do ramo, segregando por área, indicando os principais potenciais por interrupções em paradas produtivas do processo de uma mina subterrânea.

**Palavras-chave:** Mina Subterrânea, Gestão de Processos, Melhoria Continua, Indicador de Performance

### Analysis of Production Indicators in an Underground Mine

**Abstract:** Mining has been generating in the Brazilian economy an average of 3.1% in the Gross Domestic Product (GDP) during the period 2013 to 2018, however in recessions and increasingly competitive scenarios, it has become it is essential to analyze operational bottlenecks to increase the internal value flow chain, as an important factor for the survival and longevity of operations. For all industrial processes, performance indicators are a kind of compass, to seek better direction, positioning and realignment to corporate strategic goals. The article intends to disseminate the evaluations of indicators to all industries regardless of the branch, segregating by area, indicating the main potentials for interruptions in production stops in the process of an underground mine.

**Keywords:** Underground Mine, Processes management, Continuous improvement, Performance Indicators

## 1. Introdução

Nenhum processo é permanentemente adequado ou correto indefinidamente, e a mineração ao longo da história vem se reinventando com novos métodos e processos, a fim de contribuir para a evolução da humanidade em relação aos recursos minerais (CURI, 2017, p.26). Na era moderna após a segunda guerra mundial, as indústrias principalmente as do Japão, tiveram que buscar soluções para reconstrução do país, com pouco recurso disponível. Uma das empresas que conseguiram trazer soluções, reduzindo perdas, falhas e desperdícios foi a Toyota Motors (WERKEMA, 2012, p.28) injetando um pensamento enxuto ao redor do mundo nas indústrias manufatureiras e nos setores primários, inclusive o extrativista.

O principal ponto para a escolha de um trabalho de melhoria continua, consiste na escolha de situações que merecem tratativas e que são até então, são desconhecidas ou pouco elucidadas em âmbito operacional. A melhoria persistirá em analisar qualitativamente e quantitativamente as oportunidades/gargalos, procurando soluções ágeis, baixo esforço e alto impacto no que se refere aos resultados. No estudo, os problemas são verificados sob o olhar de dois grandes indicadores de performance de desempenho (KPI): produção (t) e custos (R\$). O termo KPI vem do inglês *Key Performance Indicator* (indicador chave de desempenho). Estes indicadores são utilizados para medir o desempenho das atividades processos e sistemas, permitindo o acompanhamento sistemático de metas estabelecidas (FRANCISCHINI, 2017, p.31).

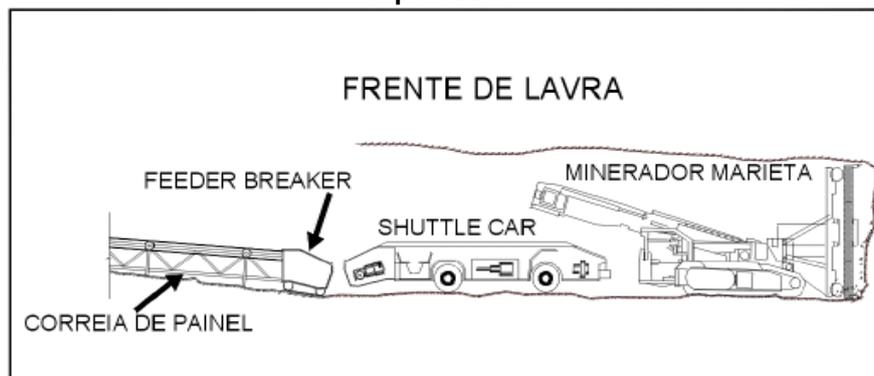
A maior vantagem do uso de *KPI's* é transformar números avulsos em conhecimento sobre o negócio. Com esses dados, se conseguem fazer previsões e identificar problemas no andamento das atividades, possibilitando fazer ajustes na estratégia caso seja necessário. Em outras palavras, os *KPI's* oferecem um diagnóstico preciso da organização, o que torna os erros no planejamento cada vez menos frequentes.

O artigo pretende demonstrar através dos indicadores, quais áreas ou setores, dentro de uma mina subterrânea tiveram maior impacto no processo produtivo e propor e escalonar ações que sejam importantes para aumento da produtividade e ao mesmo tempo na qualidade das operações.

## 2. Estudo De Caso

A área industrial de estudo é uma mineradora subterrânea, situada na região centro-leste do estado de Sergipe, no município de Rosário do Catete, distando 45 km da capital Aracaju, sendo sua operação realizada por lavra subterrânea e método de extração por câmaras e pilares (*room and pillar*). O ciclo operacional, tanto para estéril quanto para o minério, é composto por: desmonte mecânico por minerador contínuo, carregamento e transporte por *shuttle car*, fragmentador primário tipo *feeder brake*, transporte por correia transportadora e içamento de material por sistema de poço, ilustrado pela Figura 1.

**Figura 1 – Lavra com minerador contínuo em mina subterrânea de cloreto de potássio.**



**Fonte: VALE FERTILIZANTES (2012)**

O produto para venda é o cloreto de potássio (KCl), sendo produzidas basicamente três tipos de produtos após a lavra e beneficiamento (granulado, *standard*, *pink*). As características químicas do produto ( $K_2O$ ) há de serem sempre superiores a 58 % para recuperação e venda.

### **3. Identificação do Problema**

Nos últimos cinco anos durante o período de (2015 a 2019) foram desmontadas/lavradas cerca de 11.023.561 t, sendo o planejado de 10.710.000 t, estes valores representam +2,93 % durante o período. Porém nota-se que em 2019, a produção da mina teve uma redução de -13,49 % em relação a quantidade de produção orçada, o que traz a necessidade do entendimento das reais e principais perdas.

Tendo como base o indicador de produção/massa desmontada na mina (t), será analisado a performance da produção nos meses de janeiro a dezembro de 2019, para verificação de quais indicadores tiveram maior impacto na lavra, conforme descrição da Tabela 1.

**Tabela 1 – Produção de material desmontado em 2019 (t)**  
**Produção 2019 (t)**

<b>Painel</b>	<b>Unid</b>	<b>Realizado</b>	<b>Planejado</b>	<b>Varição</b>
1	t	302.963	401.679	-98.716
2	t	317.213	408.882	-91.669
3	t	240.442	280.783	-40.341
4	t	218.844	229.403	-10.559
5	t	191.844	195.801	-3.957
6	t	311.026	333.770	-22.744
7	t	35.855	32.841	3.014
8	t	17.585	22.709	-5.124
9	t	13.177	21.491	-8.314
10	t	86.911	74.375	12.536
11	t	184.796	174.754	10.042
<b>Total</b>	<b>t</b>	<b>1.920.656</b>	<b>2.176.488</b>	<b>-255.832</b>

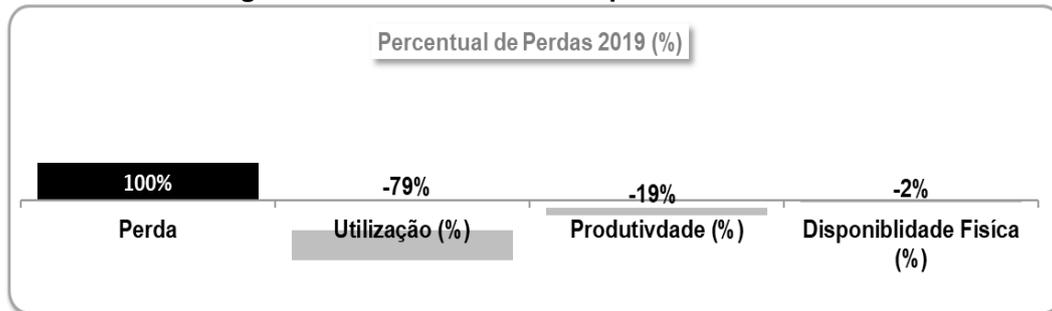
<b>Indicadores de Performance</b>				
Utilização	%	26,4	31,5	<b>-5,1</b>
Disp. Física	%	72,7	73,0	<b>-0,3</b>
Produt.	t/h	167,4	174,2	<b>-6,8</b>
O.E.E	%	18,5	23,0	<b>-4,5</b>

**Fonte: Contribuição do autor (2020)**

Baseando-se na Tabela 1, serão consideradas algumas análises, com os equipamentos de lavra contínuos, para a análise da produção no ano de 2019:

- ✓ Utilização Média: Realizada x planejada: 26,4 % x 31,5 %, representando diferença de -5,1 %.
- ✓ Disponibilidade Física Média dos Equipamentos de Lavra: Realizada x planejada: 72,7 % x 73,0 %, representando diferença de -0,3 %.
- ✓ Produtividade Média: Realizada x planejada: 167,4 t x 174,2 t planejado, representando uma diferença de -3,9 %.
- ✓ O.E.E (eficiência geral de equipamentos): Realizada x planejada: 18,5 % x 23,0 %, representando uma diferença de -19,6 %.
- ✓ Produção: Realizada x planejada 1.920.656 t x 2.176.488 t, representando uma diferença de -12,0 %.

Em 2019 as perdas produtivas (t) foram de -255.832 t de material desmontado na mina, em que representando as perdas por indicadores (utilização, produtividade e disponibilidade física), verifica-se que os maiores desvios foram: utilização (79 %), produtividade (19 %) e disponibilidade física (2 %), demonstrado na Figura 2.

**Figura 2 – Perdas acumuladas produtivas na mina**

Fonte: Contribuição dos Autores (2020)

O O.E.E (%) (*Overall Equipment Effectiveness*) significa eficiência geral do processo, sendo um KPI para medir a eficiência global de um processo/equipamento. A O.E.E (%) é representada pela equação 2, na qual traduz a real eficiência combinada da utilização (%), disponibilidade física (%) e produtividade (%).

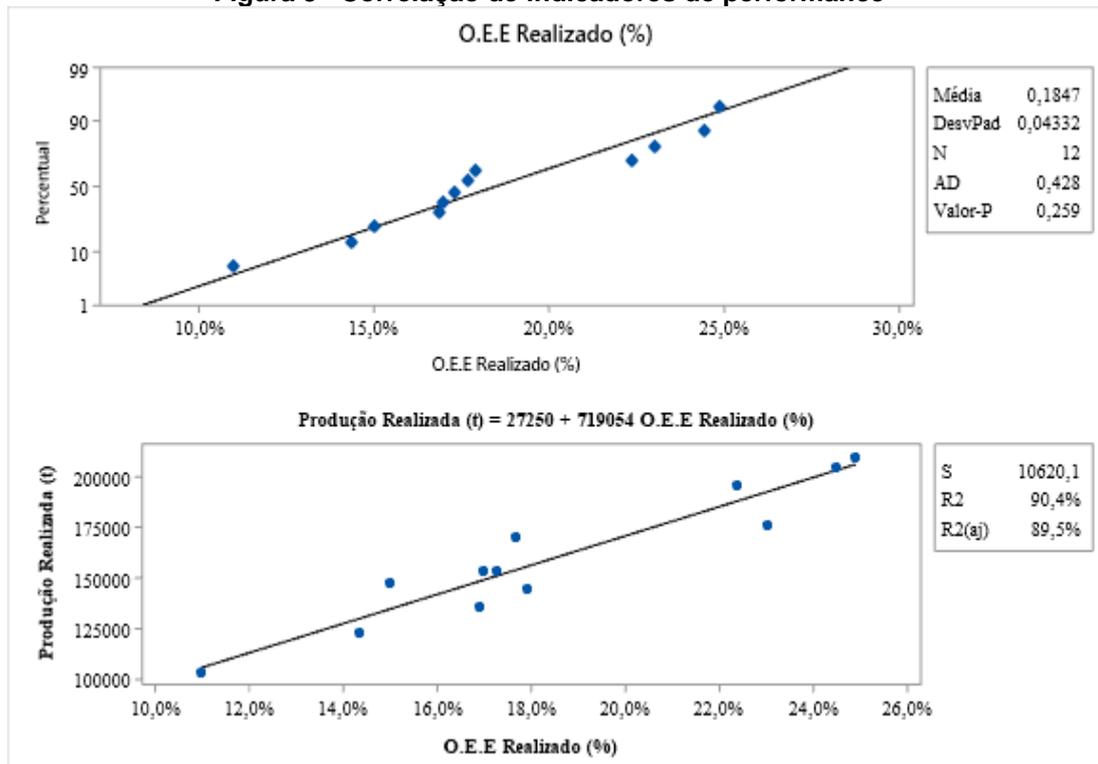
$$O. E. E (\%) = (D. F) * (Produit) * (Util) \quad (2)$$

Sendo:

- ✓ Util. % (Utilização)= Tempo em que o equipamento esteve disponível e foi utilizado.
- ✓ D.F % (Disponibilidade Física) = Tempo útil de trabalho representa a diferença entre o tempo total disponível de trabalho do equipamento e o tempo de paradas programadas pela produção
- ✓ Produit % (Produtividade)= Relação direta entre a quantidade produzida de determinado produto e/ou serviço, dividida por algum recurso necessário (por exemplo tempo) para sua confecção/processo.

O O.E.E % é o indicador de maior utilização para a operação de mina e servirá para englobar as diversas áreas. Desta forma foi verificado se o KPI é correlacionado com a produção (t) da mina a título de comprovação, evidenciado pela Figura 3.

Figura 3 –Correlação de indicadores de performance



Fonte: Contribuição dos Autores (2020)

Para verificar se há correlação deve-se buscar o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) que mede a descrição da proporção da variação y, que pode ser explicado pelas variações em x. Quando mais próximo o  $R^2$  de um (1), o coeficiente de determinação será o grau de explicação da variação y em torno da varável x.

Para determinar se os dados não seguem uma distribuição normal, deve-se comparar o valor de p com o nível de significância. Um nível de significância de 0,05 indica um risco de 5% de concluir que os dados não seguem a distribuição normal quando eles realmente a seguem. Pelos dados analisados p é 0,259, que é maior do que o nível de significância de 0,05, o que rejeita a hipótese nula. Não é possível concluir que os dados não seguem uma distribuição normal

Tendo a informação da Figura 3.9, será verificado se a produção (t) em função do indicador (O.E.E), podem ser correlacionados como hipótese de função linear. Baseando-se na equação  $Y = Ax + B$ , foi assumido que a equação 3 pode ser assumida a seguinte função linear da produção (t) em função do indicador O.E.E (%):

$$\text{Produção (t)} = 27250 + 719054 \times (\text{O. E. E})\% \quad (3)$$

Após analisar que o principal KPI que esteve com maior percentual atrelado as perdas foi a utilização (79 %), será analisado através do gráfico de Pareto em 2019, as principais causas/problemas que estiveram correlacionados com a utilização, conforme Tabela 2.

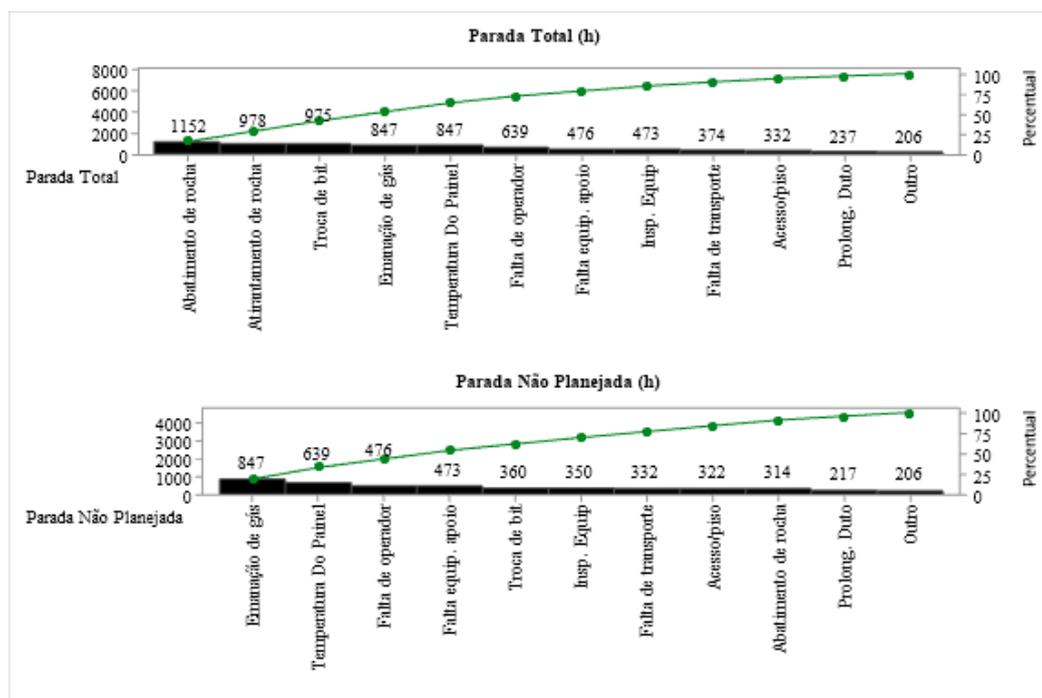
**Tabela 2 – Paradas planejadas e não planejadas relacionadas ao fator da utilização.**

Área	Causa	Horas		
		Paradas Não Planejadas (h)	Paradas Planejadas (h)	Total
Geomecânica	Atirantamento de rocha	314	838	1.152
Geomecânica	Abatimento de rocha	206	772	978
Produção	Troca de bit's	360	605	965
Geologia	Emanação de gás	847	0	847
Ventilação	Aumento de temperatura do painel	639	0	639
Produção	Falta de operador	476	0	476
Manutenção	Falta equipamento de apoio	473	0	473
Produção	Inspeção de equipamento	350	24	374
Produção	Falta de caminhonete	332	0	332
Geomecânica	Piso irregular	322	0	322
Ventilação	Prolongamento de Duto	217	19	236
<b>Total</b>		<b>4.536</b>	<b>2.258</b>	<b>6.794</b>

**Fonte: Contribuição dos Autores (2020)**

Com base na Tabela 3.4 serão divididos quantitativamente as causas de horas paradas, por paradas não planejadas e não planejadas por causas conforme Figura 4.

Figura 4 –Correlação de indicadores de performance



Fonte: Contribuição dos Autores (2020)

#### 4. Análise Dos Dados

Baseando-se nas principais paradas de lavra, foi proposta uma matriz de priorização, buscando-se realizar a correlação entre as soluções propostas por critérios de escala. Para essa matriz serão utilizados os seguintes critérios: produtividade (t/h), facilidade, rapidez, impacto sobre a causa raiz, conforme esquematizada na Tabela 4.

Tabela 4 –Matriz de priorização de problemas

Causas	Prod. (t/h)	Facilidade	Rapidez	Impacto Positivo Sobre a Causa	Total	Total
	7	8	9	10		
Abatimento de Choco	3	1	3	3	86	7°
Atirantamento de Choco	3	3	3	3	102	3°
Deslocamento Entre Painéis	5	1	3	3	100	4°
Emanação de gás	5	0	0	3	65	9°
Falta de Caminhonete	3	3	1	1	64	10°
Falta de equipamento de apoio	3	3	1	3	84	8°
Falta de operador	5	0	1	5	94	5°
Insp.Equipamento	3	5	1	3	100	4°
Piso irregular	5	3	3	5	136	1°
Prolongamento de Dutos	1	3	3	3	88	6°
Temperatura Painel	5	3	3	5	136	1°
Transporte Gaiola	3	3	0	1	55	11°
Troca de Bit's	3	3	1	1	64	10°

Legenda:  
 Correlação forte – 5    Correlação moderada – 3    Correlação fraca – 1    Correlação ausente – 0

Fonte: Contribuição dos Autores (2020)

Com referência da Tabela 5 e Figura 5, serão segregadas as possíveis causas identificadas baseada na matriz de esforço, obedecendo a premissa de escolha daqueles problemas que detenham baixo esforço de execução e tempo, e alto impacto ao processo, na qual possam auxiliar a melhoria da utilização.

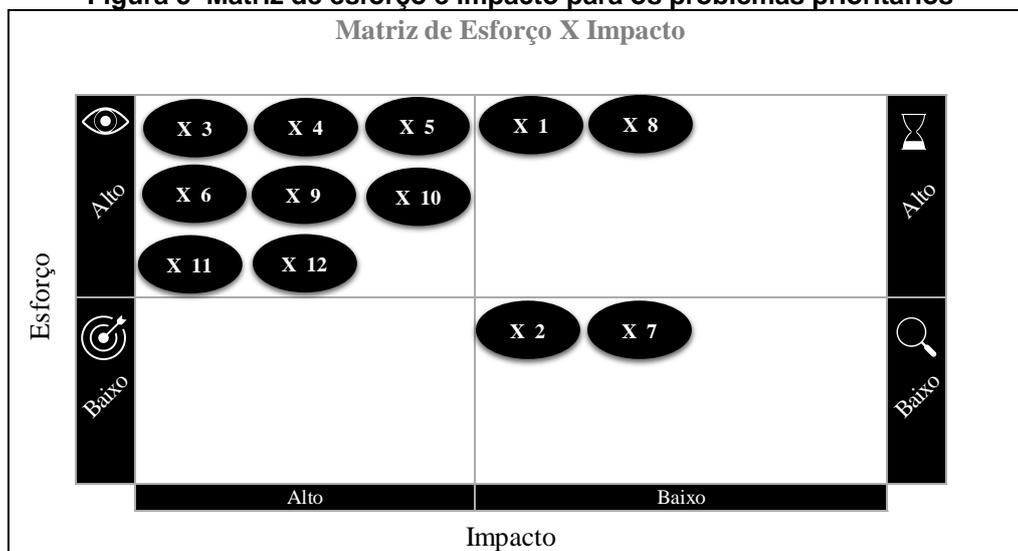
**Tabela 5 –Matriz de esforço e impacto**

	Entradas do Processo Causas de Paradas	Possíveis Causas Prioritárias			Total	Total (%)	Impacto	Esforço
		Horas de Equipamentos Parados	Sequenciamento de produção	Produção diária				
		Peso	10	8				
X1	Troca de Bit's	1	3	1	43	4,33%	Baixo	Alto
X2	Insp.Equipamento	1	1	1	27	2,72%	Baixo	Baixo
X3	Emanação de gás	5	5	5	135	13,58%	Alto	Alto
X4	Aumento Temperatura Painel	5	5	5	135	13,58%	Alto	Alto
X5	Atirantamento de Choco	5	3	3	101	10,16%	Alto	Alto
X6	Abatimento de Choco	5	3	3	101	10,16%	Alto	Alto
X7	Prolongamento de Dutos	1	1	1	27	2,72%	Baixo	Baixo
X8	Transporte Gaiola	3	1	1	47	4,73%	Baixo	Alto
X9	Falta de operador	5	5	5	135	13,58%	Alto	Alto
X10	Falta de Caminhonete	3	3	3	81	8,15%	Alto	Alto
X11	Falta de equipamento de apoio	3	3	3	81	8,15%	Alto	Alto
X12	Piso irregular	3	3	3	81	8,15%	Alto	Alto

**Legenda:**  
 Correlação forte – 5    Correlação moderada – 3    Correlação fraca – 1    Correlação ausente – 0

Fonte: Contribuição dos Autores (2020)

**Figura 5–Matriz de esforço e impacto para os problemas prioritários**



Fonte: Contribuição dos Autores (2020)

Analisado a Figura 5 foi montada a seguinte escala de priorização:

- ✓ 1°- alto impacto x baixo esforço- (0 oportunidades).
- ✓ 2°- alto impacto x alto esforço- (8 oportunidades).
- ✓ 3°- posição baixo impacto x baixo esforço- (2 oportunidades).
- ✓ 4°- baixo impacto x alto esforço- (2 oportunidades).

Pela matriz de esforço e impacto, não ocorreram oportunidades descritas como: alto impacto x baixo esforço, no qual será dado continuidade ao sequenciamento de priorização de causas avaliadas como: alto impacto x alto esforço. Tiveram oito causas, na qual será optado por aquela com impacto significativo de horas paradas não planejadas.

Como questão inicial para tratativa de perdas produtivas, pode-se optar por aquela que representa o (X4) na matriz de esforço e impacto (aumento de temperatura do painel). Para a análise atual não seria proposto a situação/oportunidade emanada de gás, pela falta de dados, estudos e bases técnicas para a situação avançada. Através do cálculo financeiro pelas perdas produtivas, somente este problema resultou em -22.596 t de ROM, gerando perdas estimadas de R\$ 5.120.000 por produto, conforme memória de cálculo na Figura 6.

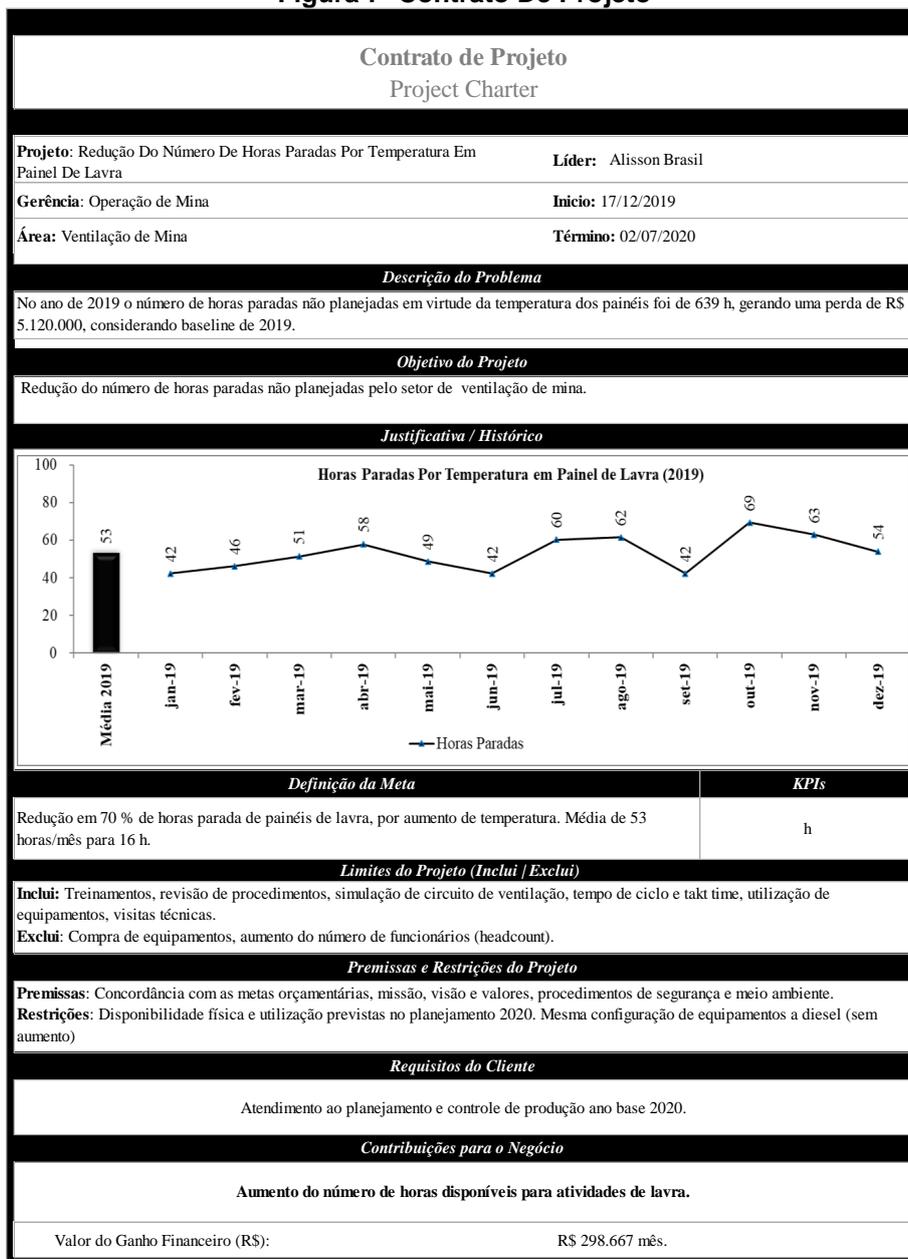
**Figura 6 –Matriz de esforço e impacto para os problemas prioritários**

<b>MEMÓRIA DE CÁLCULO DE PERDA</b>			
<b>Métricas Financeiras</b>			
	Métrica	Unidade	2.019
Planejado	<b>Volume Programado KCI</b>	kt	484,877
	<b>Margem</b>	R\$/t	1.010
<b>Métricas Técnicas</b>			
	Métrica	Unidade	2.019
Perdas 2019	<b>Horas Paradas Painel</b>	h	639
	<b>Disponibilidade Física</b>	%	73%
	<b>Utilização</b>	%	28%
	<b>Horas Efetivas Paradas</b>	h	131
	<b>Produtividade</b>	t/h	173
	<b>ROM</b>	t	22.596
	<b>Teor</b>	%	25%
	<b>Recuperação Met.</b>	%	82%
	<b>KCI</b>	t	5.071
<b>Resultados Financeiros 2019:</b>			
	Item	Unidade	2.019
Perda Estimada	Δ Receita	R\$	5.120.000
	Δ Custo	R\$	0
	<b>Δ EBITDA</b>	<b>R\$</b>	<b>5.120.000</b>
	<b>Δ Investimento Corrente</b>	<b>R\$</b>	<b>0</b>

Fonte: Contribuição dos Autores (2020)

Para ações estruturadas poderiam ser realizadas baseando-se na metodologia *Lean Seis Sigma*. O contrato de projeto (*Project Charter*) é a primeira iniciativa, que comprova a descrição do problema, objetivo do projeto, justificativa, metas e ganhos esperados conforme Figura 7. Este projeto se adotado a causa X4 – (aumento de temperatura do painel), poderá ser adotado para redução do número de horas paradas por temperatura em painel de lavra, com redução do número de horas paradas por mês de 53 h para 16 h, representando - 70 % do número de horas indisponíveis.

**Figura 7- Contrato De Projeto**



**Fonte: Contribuição dos Autores (2020)**

## 5. Conclusões

Através da análise do indicador de performance em 2019, a utilização (%) representou o maior percentual de perdas produtivas com perdas percentuais na massa desmontada em 79 %. Verifica-se que o indicador O.E.E (%) tem alta correlação com a produção ( $R^2=89,5$  %), o que confirma a importância da análise de indicadores chaves de desempenho no processo atual. Através da análise de perdas, as paradas não planejadas foram tiveram impacto em 4.536 h no processo produtivo, e as paradas planejadas em 2.258 h. As horas paradas não planejadas (PNP) foram responsáveis por 66,8 % do total de paradas, tornando visível que o processo apresenta pontos de melhoria há serem revisados.

A matriz de esforço e impacto não foram verificadas causas com baixo esforço e alto impacto, porém seguindo o preceito de alto impacto no processo, as causas de alto esforço e alto impacto resultaram em oito possíveis causas de estudo. Uma das causas avaliadas em primeira opção (emanação de gás) não entraria em possível estudo de melhoria, por não prover dados locais, dados quantitativos, além do alto esforço por falta de dados científicos. Seguindo o posicionamento das causas ranqueadas estaria a causa do aumento de temperatura do painel (X4), representando um impacto 639 horas/ano nas horas disponíveis ao processo para operação de lavra.

Estas horas em 2019 resultaram em perdas produtivas de 22.596 t, equivalendo a R\$ 5.120.000 por venda do produto comercializado, sendo importante a criação de ações em curto espaço de tempo e alto impacto, para redução de paradas na operação de lavra, minimizando os desperdícios de horas paradas disponíveis, com os preceitos por exemplo de ferramentas e metodologias conhecidas (Lean Manufacturing e Seis Sigma). Estas ações poderiam reduzir as horas paradas de 53 h/mensais para 16 h/mensais, podendo gerar incremento estimado de R\$ 298.667 mensais com planos de ações estruturados.

## 6. Referências

COURA, J.F. (2015). Panorama da Mineração em Minas Gerais. Instituto Brasileiro De Mineração, Sindicato Nacional da Indústria Da Extração do Ferro de Metais, p.280.

CURI, A. **Lavra de Minas**. São Paulo:Ed. Oficina De Textos, 2017.

FRANCISCHINI, P.G. **Indicadores de Desempenho: Dos objetivos à ação-** Métodos para elaborar KPIs e obter resultados. Rio De Janeiro: Ed, Alta Books, 2017.

OHNO, T. **O Sistema Toyota de produção: além da produção em larga escala**. Porto Alegre: Ed, Bookman, 1997.

**WERKEMA, C. As ferramentas da qualidade no gerenciamento de processos.**  
Belo Horizonte: Ed, Fundação Christiano Ottoni, 1995

## APÉNDICE II

Dear Alisson

It is a pleasure to greet you and at the same time on behalf of the Academic Committee of the **II INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MINE VENTILATION OF SOUTH AMERICA**, to inform you that your article entitled "Mobile Climatization For Feasibility Of Drilling Places And Mining Fronts In An Underground Mine" has been reviewed and **APPROVED** by the committee.

In that sense, I am enclosing a format for you to authorize the publication of your article, a models for your professional short review with photography included; as well as the ppt template for your presentation, which should be prepared considering a maximum of 20 minutes of presentation.

I ask you to send the requested as soon as possible, thank you very much in advance.

Expecting your kind attention to the present, I say goodbye.

kind regards,

**Vanessa Taboada**

*Coordinadora / Coordinator - SIVM 2021*



II SIMPOSIO INTERNACIONAL EN VENTILACIÓN DE MINAS DE SUDAMÉRICA  
Del 28 al 31 de marzo de 2021  
**ARTÍCULOS DE VENTILACIÓN DE MINAS**



### 3. ASPECTOS AMBIENTALES Y DE SEGURIDAD: Seguridad, Salud, Protección ; Legislación ; Incendios y Explosiones ; Refugios Mineros ; Auditoría de Ventilación

Nº	TÍTULO	AUTORES	EMPRESA / INSTITUCIÓN	PAÍS
A5	Licuefacción de Gases Emitidos por Voladuras Subterráneas en Ácidos Industriales	Lilia Betzabeth Durand Mendoza	Universidad Nacional Mayor de San Marcos	PERÚ
A6	Mobile Climatization For Feasibility Of Drilling Places And Mining Fronts In An Underground Mine	Alisson Brasil ; Renan Collantes Candia	UFMG / CPGEM ; DEMIN	BRASIL
A7	Análisis de Ventilación en las Fiscalizaciones para Evitar Accidentes	Ángel Vejarano Sánchez	Servenco & Asociados	PERÚ
A8	Equipos a Batería y su Influencia en un Sistema de Ventilación	Denis E. Quispe Obregon	UNCP	PERÚ

### 4. CASOS ESPECIALES DE VENTILACIÓN: Automatización ; Robótica ; Calor y Refrigeración en Mina ; Construcciones en Minas Profundas ; Modelamiento Numérico ; Otros

Nº	TÍTULO	AUTORES	EMPRESA / INSTITUCIÓN	PAÍS
C1	Experiencias en el Control del Efecto Pistón en la Unidad Minera El Porvenir	Daniel Naupari; Jorge Godos	Nexa Resources El Porvenir S.A.C.	PERÚ
C2	Underground Air Quality Monitoring and Control	Shannon Katary; Cindy Chesney; Soren Canepa W.	Maestro Digital Mine / Airtec S.A.	CANADÁ - PERÚ
C3	Estrategias para la Integración de Sistemas de Ventilación Minas	José Antonio Rojas Córdova	Minconsulting SAC	PERÚ
C4	Mine Ventilation for Artisanal and Small-Scale Mining in the Arequipa Region, Perú	Jürgen Brune ; Kirk H. McDaniel ; Lee J. Zamalloa ; Manuel Rubén Figueroa Galiano ; Jorge Freddy Enriquez Ramos	The Colorado School of Mines / Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa	USA / PERÚ

## Mobile climatization for feasibility for mining fronts in an underground mine

UFMG, *alisson\_engh@yahoo.com.br*, +55 71 992468960 <sup>1</sup>  
UFMG, *rcandia@demin.ufmg.br*, +55 31991877636 <sup>2</sup>

### ABSTRACT

One of the main parameters for operational continuity in an underground mine is the temperature factor on the service fronts (°C). The current regulatory standards for the underground environment, express the acceptable limit for each work activity to be considered. If the underground environment is inadequate, it can cause discomfort, which suffers physiological effects such as loss of interest in activities, frequent rest, desire to complete the activity quickly, reduction in the degree of concentration, directly affecting the operational safety factor. Sometimes high temperatures can prevent drilling activities, mining fronts, support. The study aims to evaluate mining planning scenarios for 2021 and 2022 related to ventilation sizing and propose mobile air conditioning test for feasibility of mining fronts and/or areas for geological drilling.

*KEYWORDS: Mine Ventilation/ Viability/ DMAIC/ Mine Climate*

## 1. Introduction

The current challenges of mining operations and especially as underground mines are gradually becoming greater. Mines are becoming increasingly deep, requiring more and more mechanized work, and the legal requirements (health, safety, and the environment), becoming increasingly demanding, seeking greater process sustainability, and increasing operational efficiency for greater mineral recovery. From the ventilation point of view the main effects of depth are increased heat and humidity, and increased conditions of previous tension, forcing the increase of support of excavations. These factors lead companies to focus their attention, efforts, technologies, and resources on controlling the stability of excavations and on efficient ventilation systems.

One of the major problems of underground mines refers to thermal discomfort that is usually tied to a temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ). The literature points out more than twenty-three underground heat sources, highlighting the geothermal flow, combustion engines, the use of explosives, the lighting network, the oxidation of certain types of ore, the infiltration of thermal waters, movement of the massif, the compressed air network and the presence of grid number of workers in certain types of mining, are some of the sources of heat characteristics of an underground mining [1].

Working in underground environments requires some procedures to ensure the minimum safety and health conditions for. The employee's prolonged exposure to unfavorable thermal conditions inevitably lead to increased temperature, produces physiological effects that reduce yield and can even cause death [2]. Human metabolism is accompanied by heat generation, with which the body temperature remains close to  $36.9^{\circ}\text{C}$ , and in contact with the temperature of the surrounding air man may feel feeling cold or heat and the physiological effects of low and high temperatures [3].

The reports that the effects of inadequate temperature and humidity conditions make workers less aware of the visual cues around them, and these reductions eventually lead to a point where attention deficit compromises the safety and health of workers with the increased potential for serious accidents [4]. When a person is exposed to a temperature higher than that of comfort, they suffer the physiological

effects such as: loss of interest in the activities they perform, frequent rests or breaks, desire to finish the job quickly, irritability, reduced degree of concentration, lack of meaning and attention and even death.

The regulatory standard NR15 Brazil [5], shows an acceptable limit for IBUTG, in which it depends on the type of work activity (level, moderate or heavy), directly affecting do the metabolic rate of heat generated by the body. Prolonged exposure of man in unfavorable thermal conditions inevitably leads to increased temperature in the body and therefore produces physiological effects that reduce its yield. The regulatory standard NR 17 Brazil [6], expresses the effective temperature must be between 20.0 °C and 28.0 °C so that the work is performed in the best possible way, a certain temperature range, the worker's income decreases rapidly, reaching diseases or accidents.

This article aims to evaluate the feasibility of installing mining fronts and survey squares in five different scenarios employing six mining fronts and one or two drilling squares, including the use of up to four rigs, and propose a mobile air conditioning alternative for the viability of mining fronts in the mine in 2021 and 2022.

## **2. Introduction**

### **2.1 Location**

The mine of the study is located in the central-east region of the state of Sergipe, in the municipality of Rosario do Catete, located 45 km from the capital Aracaju, and its operation is carried out by underground mining and extraction method by room and pillar). The operating cycle, for both sterile and ore, is composed of mechanical dismantling by continuous miner, loading and transport by shuttle car, primary feeder brake type fragmented, conveyor belt transport and material lifting by well system.

### **2.2 Theoretical framework**

In Brazil, the criteria for calculating the total flow of fresh air in underground mines are those determined by Brazilian legislation through Regulatory Standard 22, Ordinance number 2,037, of December 15, 1999, paragraph 22.24 (Ventilation in Underground Activities), in addition to NR 15, which recommends the requirement of minimum air currents that must be provided. Brazilian legislation establishes tolerance limit values for air environmental agents, such as gases, vapors, mineral dust, and ambient temperature conditions. In addition to mining regulatory standards, there is ANM Ordinance 237 dated October 19, 2001, chapter 6. In general, all these (NR 15, 22 and ordinance 237) establish that ventilation systems must meet basic prerequisites such as:

- Minimum oxygen supply of at least 2 m<sup>3</sup>/s per person and equipment.
- Continuous air renewal.
- Effective dilution of flammable or harmful gases and dust from the working environment.
- Temperature and humidity suitable for human labor.
- Continuous and operating operation.
- Location, flow, and pressure of the main fans
- Direction and air flow.
- Location and function of all doors, barricades, curtains, dikes, sidings and other ventilation flow control devices.

The underground conditions to which employees are subjected can produce an unbalanced metabolism and, for this reason, must be controlled. One of the main parameters is the IBUTG °C (wet bulb index – globe thermometer – obtained by equation 1, according to Regulatory Standard 15 of Ordinance 3.214/78, which establishes that heat exposure should be evaluated through the "Wet bulb index – globe thermometer" (Ministry of Labor and Employment, 1978).

$$IBUTG = 0.7t_{bn} + 0.3t_g \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (1)$$

In which:

- ✓ T<sub>bn</sub>: Natural wet bulb temperature (in °C).

- ✓ Tg: Globe temperature (in °C).
- ✓ Tbs: Dry bulb temperature (in °C).

In work situations (mild, moderate, punctuated) the Brazilian standard set tolerance limits for temperature exposure, under continuous work, rest at the place of service and/or activity only with measures adopted mitigating control, according to Table 1.

Table 1- Intermittent working regime according to IBUTG °C [5].

<b>Intermittent work regime with rest at the workplace</b>	<b>Type of activity</b>		
	<b>Light</b>	<b>Moderate</b>	<b>Heavy</b>
Continuous Works	Up to 30.0	Up to 26.7	Up to 25.0
45 minutes work x 15 minutes rest	30.1 to 30.6	26.8 to 28.0	25.1 to 25.9
30 minutes work x 30 minutes rest	30.7 to 31.4	28.1 to 29.4	26.0 to 27.9
15 minutes work x 45 minutes rest	31.5 to 32.2	29.5 to 31.1	28.0 to 30.0
Work is not permitted without the adoption of adequate control measures	>32.2 °C	> 31.1°C	> 30.0°C

### 2.3 Methodology

The first task performed was to perform the calibration of the Vuma model, which generated the initial model was adjusted to reproduce as reliable as possible the flows and temperatures measured underground throughout the third quarter of 2020. From this model, the location and dimension information of the main losses were collected, to guide an action plan to reduce them to the level necessary to meet the proposed scenarios. The Table 2 shows the amount of air available in the mine and Table 3 the amount of air flow currently used. The Figure 1 shows the configuration of the mine related to the service fronts.

Table 2- Characteristics of the main ventilation system.

<b>Location</b>	<b>Flow (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Air density (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Air flow (Kg/s)</b>	<b>Temperature (°C)</b>
CSC	117.00	1.118	130.806	21.6 á 22.2
NEUS	235.00	1.117	262.495	20.0 á 22.0
NSC	113.00	1.227	138.651	19.4 á 20.3
<b>Total</b>	<b>465.00</b>		<b>531.952</b>	

Table 3- Current air flow for the mining fronts e geologic survey.

<b>Location</b>	<b>Unit</b>	<b>Flow</b>
Mining front 5	m <sup>3</sup> /s	26.81
Two area geologic survey (NE)	m <sup>3</sup> /s	26.88
Mining front 6	m <sup>3</sup> /s	28.08
Mining front 3	m <sup>3</sup> /s	38.95
Mining front 4	m <sup>3</sup> /s	26.13
Mining front 1	m <sup>3</sup> /s	24.32
Mining front 2	m <sup>3</sup> /s	36.25
Maintenance area	m <sup>3</sup> /s	23.26
Future mining Front 7	m <sup>3</sup> /s	27.5
Future mining front 8	m <sup>3</sup> /s	25.00
<b>Total flow</b>	<b>m<sup>3</sup>/s</b>	<b>283.18</b>
<b>Vazão de ar disponível</b>	<b>m<sup>3</sup>/s</b>	<b>465.00</b>
<b>Air losses</b>	<b>m<sup>3</sup>/s</b>	<b>182.32</b>
<b>Air losses</b>	<b>%</b>	<b>35.60</b>

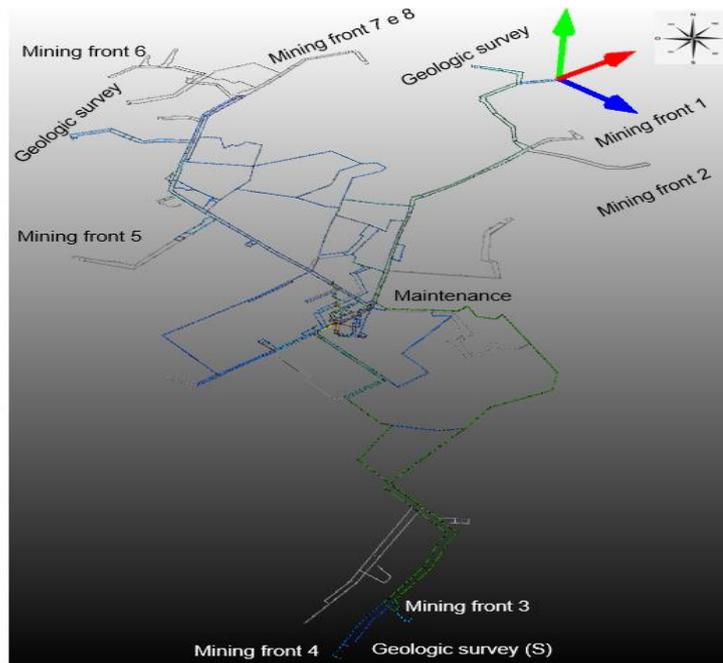


Figure 1- Map of the mine and location of the service fronts.

### 3. Results and discussion

Using the simulation software (Vuma) three simulations were performed, in different scenarios, to analyze whether with the current air flows, what temperatures would be found for these sites, to evaluate the feasibility of operation. These three scenarios were considered for evaluation:

- Scenario 1: Add a search area in the northern area of the mine and maintaining the current scenario.
- Scenario 2: Add a search area in the southern area of the mine and maintaining the current scenario.
- Scenario 3: Add two search areas in the southern area of the mine and maintaining the current scenario.

For the simulation, the following assumptions were adopted:

- In the analytical analysis, the load losses for the regulators were not considered, through equivalent resistance.
- Considered surface temperature on average of 27.2 °C for refrigeration

system

- For the calculation of the friction pressure drop, the case was considered with the highest pressure drop.
- The emission values of gases and dust were not considered.
- Atkinson's friction factor was considered constant and for the turbulent and fully developed flow situation.
- Shock losses were not used due to the wide variety losses and time for analysis of this calculation.
- The jobs were considered constant to the current ones.

### 3.1 Scenario 1

The simulation was carried out with the addition of another area for geological drilling in the northern area of the mine (N), considering the current scenario of equipment and the same principle of ventilation operation. The simulations are presented in Table 4 and the Figure 2, which maintains a maximum temperature  $\leq 31.1$  °C, in which the new area for geological drilling would be at a maximum temperature of 30.1°C, in which you can maintain activities according to the Brazilian Regulatory Standard (NR 15), which is related to activities, operations and unhealthy agents.

Table 4- Simulation of flow rate and temperature for the first scenario

<b>Scenario 1</b>		
<b>Location</b>	<b>Flow (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Temperature (C°)</b>
Mining front 5	26.81	29.2
Two area geologic survey (NE)	31.70	30.3
One area geologic survey (N)	12.30	30.1
Mining front 6	35.06	28.8
Mining front 3	36.95	29,1
Mining front 4	31.10	29.0
Mining front 1	29.84	28.8
Mining front 2	34.25	29.7
Maintenance workshop	23.26	26.8
Future Mining Front 7	27.50	29.8
Future Mining front 8	25.03	30.3
<b>Total flow</b>	<b>313.80</b>	m <sup>3</sup> /s
<b>Available air flow</b>	<b>465.00</b>	m <sup>3</sup> /s
Air losses	<b>151,2</b>	m <sup>3</sup> /s
Air losses	<b>32.52</b>	%

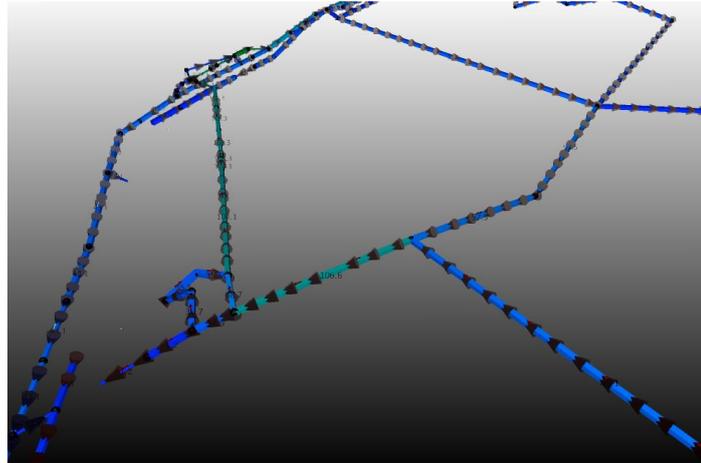


Figure 2- Schematic drawing for the scenery 1.

### 3.2 Scenario 2

The simulation was carried out with the addition of another area for geological drilling in the southern area of the mine, considering the current scenario of equipment and the same principle of ventilation operation. The simulations are presented in Table 5 and the Figure 3, which maintains a maximum simulated temperature  $\leq$  at 31.1 °C, where the new area for geological drilling would be at a maximum temperature of 30.6°C, and that the permissible air losses should be a maximum of 30.55 % in order to maintain this scenario.

Table 5- Simulation of flow rate and temperature for the second scenario.

<b>Scenario 2</b>		
Location	Flow (m <sup>3</sup> /s)	Temperature (C°)
Mining front 5	26.81	29.2
Two area geologic survey (NE)	31.70	30.8
One area geologic survey (S)	21.40	30,6
Mining front 6	35.06	28.8
Mining front 3	36.95	29,1
Mining front 4	31.10	29.0
Mining front 1	29.84	28.8
Mining front 2	34.25	29.7
Maintenance workshop	23.26	26.8
Future Mining Front 7	27.50	29.8
Future Mining front 8	25.03	30.3
Total flow	<b>322.9</b>	m <sup>3</sup> /s
Available air flow	<b>465.00</b>	m <sup>3</sup> /s
Air losses	<b>151,2</b>	m <sup>3</sup> /s
Air losses	<b>30.55</b>	%

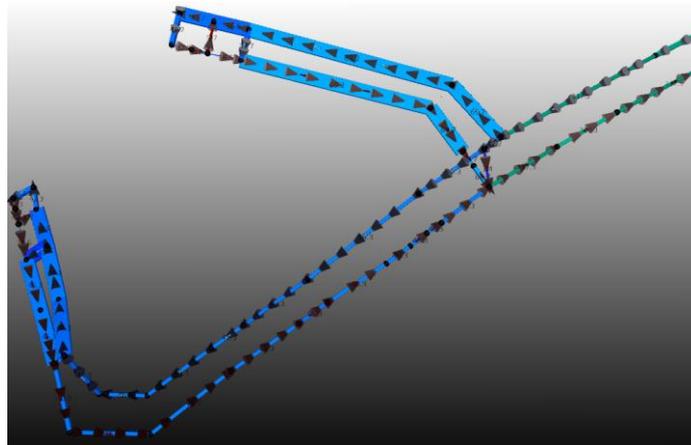


Figure 3- Schematic drawing for the scenery 2.

### 3.3 Scenario 3

The simulation was carried out with the addition of two areas for geological drilling in the southern area of the mine, considering the current scenario of equipment and the same principle of ventilation operation. The simulations are presented in Table 6 and the Figure 4, in which there will be a temperature higher than  $\geq 31.1$  °C, in which the two new areas would have a temperature of 31.5°C, which would make this scenario impossible for temperature reasons.

Table 6- Simulation of flow rate and temperature for the third scenario.

<b>Scenario 3</b>		
<b>Location</b>	<b>Flow (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Temperature (C°)</b>
Mining front 5	26.81	29,6
Two area geologic survey (NE)	31.70	30.8
Two area geologic survey (S)	36.10	31.5
Mining front 6	35,22	29,3
Mining front 3	34.95	29,5
Mining front 4	31.40	29.0
Mining front 1	29.44	28.9
Mining front 2	34.70	29.6
Maintenance workshop	23.26	27
Future Mining Front 7	28.10	29.9
Future Mining front 8	25.03	30.3
Total flow	<b>336.9</b>	m <sup>3</sup> /s
Available air flow	<b>465.00</b>	m <sup>3</sup> /s
Air losses	<b>128,1</b>	m <sup>3</sup> /s
Air losses	<b>27.55</b>	%

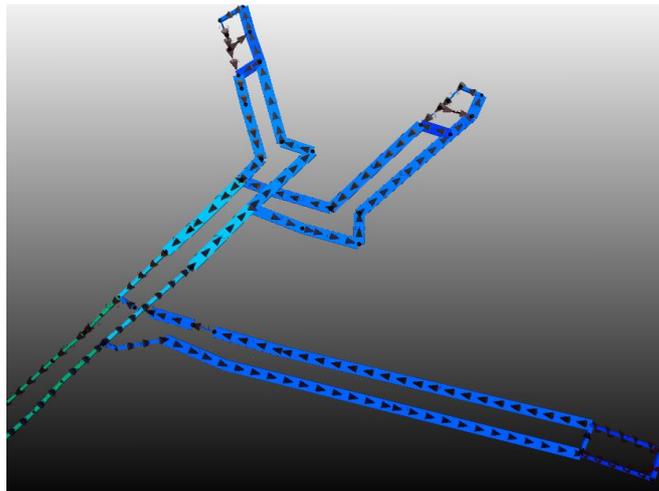


Figure 4- Schematic drawing for the scenery 3.

#### 4. Results Discussion

With the results obtained by scenarios 1, 2 and 3, it is verified who in one of these simulations (scenario 03), the above temperature would be  $\geq 31.1$  °C, and some control and/or engineering measure is necessary for the feasibility of mine activities

The prototype of a mobile air conditioner equipped to the fan for testing was evaluated in the market, with the objective of reducing temperature on the mining fronts. The installation of the air conditioner for its proper confirmation of effectiveness, should be taken as main points: the reduction of the nominal temperature and maintenance of the previous parameters of the workplace, such as staunch of the massif and minimization of rock displacement to due to the presence of water.

IBUTG temperature measurements (°C) were collected and temperature valves were analyzed for the period from 01/03/20 to 30/09/20. The Figure 5 and the Table 7 demonstrates these values for the period.

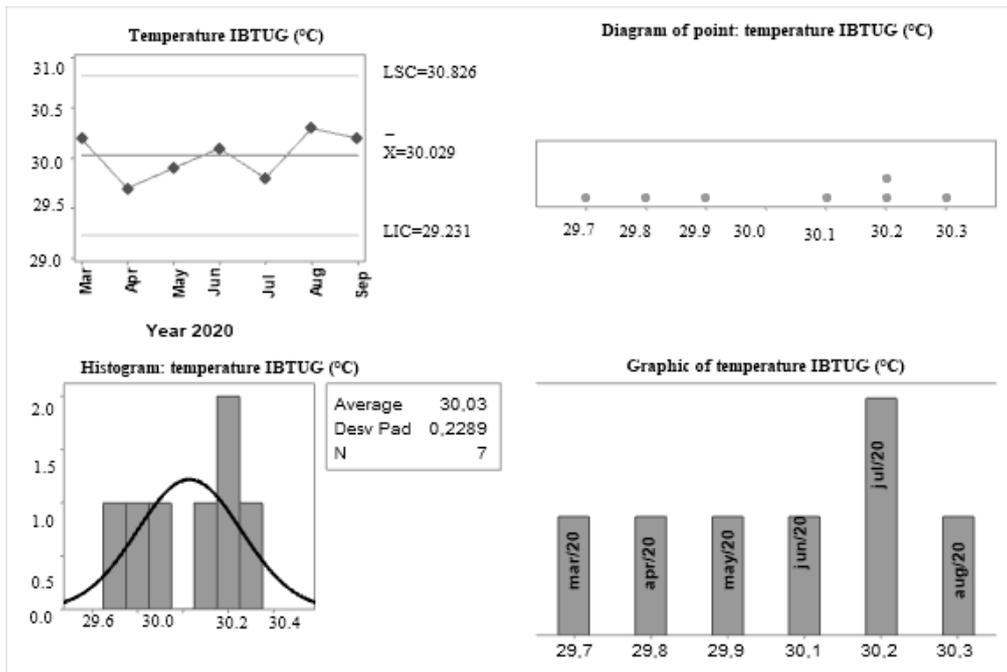


Figure 5- Temperature statistics before the air conditioner test.

Table 7- Statistics of temperatures before air conditioning tests.

Variable	Average	Desv. Pad.	Variance	Minimum	Maximum	Amplitude
IBTUG temperature (°C)	30.03	0.23	0.05	29.70	30.30	0.60

It is observed from the collected data that the average temperature was 30°C, being below the NR15, in which it recommends studies below 31.1 °C.

Through a prototype available in the market, the installation of a mobile air conditioner was analyzed, in which it would be coupled to the secondary ventilation system. The operating principle is based on the exchange of evaporitic cooling, in which the air itself yielding sensitive heat to the humidify water. When the air is passed through the air conditioner of the hive, there is the exchange of heat between water and air. The water that evaporates ensures a higher humidity of the cooled air, being replaced by a buoy that keeps the level of the reservoir constant, as shown at Figure 6.

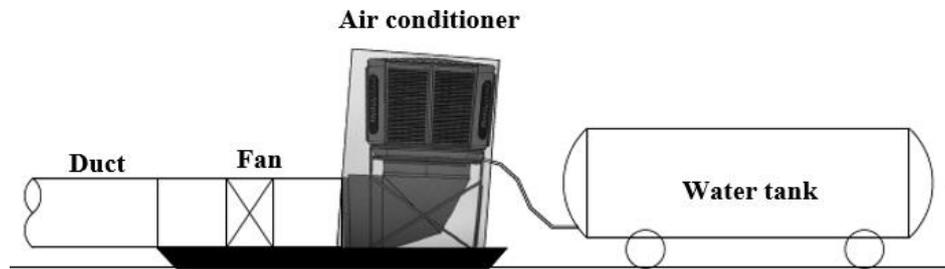


Figure 6- Prototype of mobile air conditioner.

The installation of the air conditioner for its proper confirmation of effectiveness, should be taken as main points: the reduction of the nominal temperature and maintenance of the previous parameters of the workplace, such as staunch of the massif and minimization of rock displacement to due to the presence of water.

The installation was carried out on 10/01/20, in one of the areas of probing/exploration, due to smaller displacements of the prototype, which could have due to the movement of the fans on the mining fronts, conformed Figure 7.



Figure 7- Installation of the air conditioner attached to the secondary fan.

After the installation of the air conditioner, temperature measurement was collected, always maintaining the operational continuity of the test, for the stabilization of temperature in the environment with the air conditioner, ventilation ducts, geothermal grade of the rock, equipment. The Figure 8 shows us the data collected from temperature during the period. The Table 8 shows the summary of the data obtained.

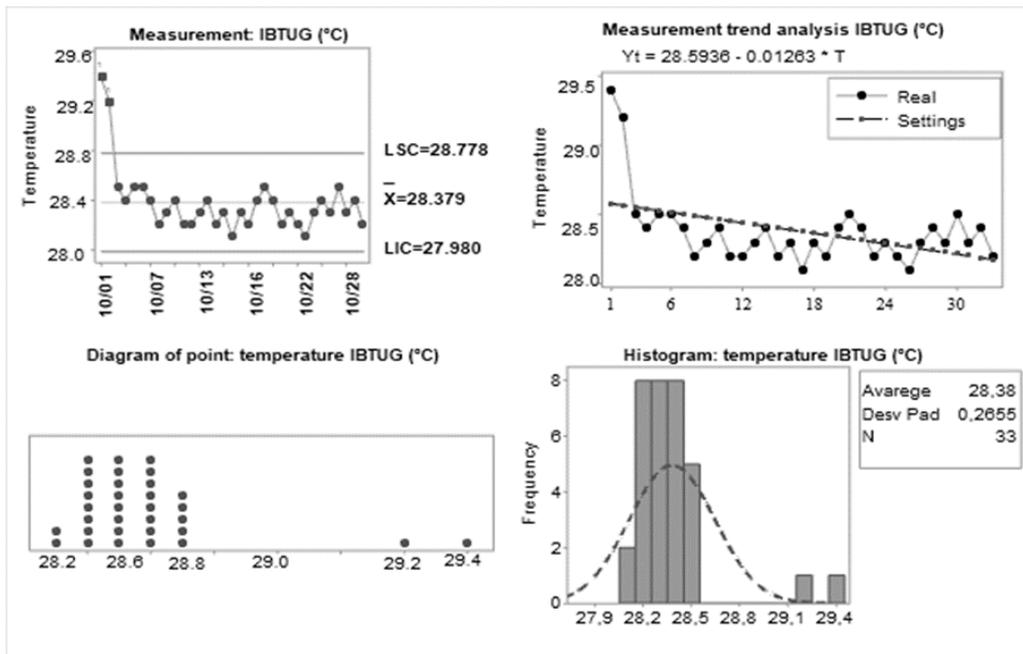


Figure 8- Temperature statistics after air conditioner test.

Table 8- Temperature statistics after the air conditioning test.

Variable	Average	Desv. Pad.	Variance	Minimum	Maximum	Amplitude
IBTUG temperature (°C)	28.40	0.27	0.35	28.10	29.40	1.30

#### 4. Conclusions

The study shows the importance of evaluating different scenarios related to ventilation for the strategic planning of the mine. It was verified that one of the simulations (scenario 3) cannot keep the temperature below the limit allowed by the Brazilian regulatory standard (NR15)  $\leq 31.1$  °C, and scenario 2 with measured temperatures already close to the limit, requiring control measures (reduction of air losses) and/or engineering measures in order to enable such activities.

The study of the air conditioning project for the mining fronts was evaluated since it would not require extra demands of electricity. It was verified that the use of mobile air conditioners in each area of the mine resulted in an average reduction of 1.6°C (-5.33 %) on the service front considering the same layout, flow, and equipment. The installation of these air conditioners may enable mining and/or geological fronts and

can be a proven means of effectiveness of temperature improvement on service fronts.

## References

- [1] COSTA, L.V, p.117, Análise via simulação da ventilação em mina subterrânea: estudo de caso mina Córrego do Sítio, p.117, Thesis for the Doctor, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2019.
- [2] GANCEV, B. F, p.93, Avaliação de condições de qualidade do ar em mina subterrânea, São Paulo: Universidade De São Paulo (2006).
- [3] TORRES, V.F.N, p.550, Engenharia ambiental subterrânea e aplicações, Cetem/CYTED, Rio de Janeiro (2005).
- [4] Hartman, H. L, Mutmansky, J. M, Ramani, R. V, Wang, Y. J, p.791, Mine ventilation and air conditioning, Wiley Interscience (1991).
- [5] Ministério do Trabalho e Emprego, NR15- Atividades e Operações Insalubres. Ministério do Trabalho e Emprego. Acesso disponível <<http://www.mte.gov.br/temas/segsau/legislacao/normas/conteudo/nr15>>. [accessed.10. july.2020] (1978).
- [6] Ministério do Trabalho e Emprego, NR22- Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração. Ministério do Trabalho e Emprego. Acesso disponível <<http://www.mte.gov.br/temas/segsau/legislacao/normas/conteudo/nr17>>. [accessed.23. august.2020] (1999).

## APÉNDICE III



II SIMPOSIO INTERNACIONAL EN VENTILACIÓN DE MINAS DE SUDAMÉRICA  
Del 28 al 31 de marzo de 2021  
**ARTÍCULOS DE VENTILACIÓN DE MINAS**



### 1. INGENIERÍA DE VENTILACIÓN: Control y Aire Acondicionado ; Planificación, Control y Diseño de Red de Ventilación ; Sistemas de Control de Ventilación (VOD) ; Ventilación de Túneles

Nº	TÍTULO	AUTORES	EMPRESA / INSTITUCIÓN	PAÍS
11	Optimization of the Ventilation Circuit with the Support of DMAIC Methodology	Alisson Brasil ; Renan Collantes Candia	UFMG / CPGEM ; DEMIN	BRASIL
12	Diseño de Red de Ventilación para Método Sub Level Stopping por Modelamiento en Software Ventsim en Mina El Dorado	Abraham Bernabé Muñoz Guerrero ; Jorge Antonio Villarroel Villalobos	Universidad Andrés Bello	CHILE
13	Sistema de Ventilación Invertida para Control y Dilución de Gas CO2	Luis Garay Lazo ; Guido Francesco Fontis Calderon	Catalina Huanca Sociedad Minera S.A.C.	PERÚ
14	Estimación de Caudales de Aire para Diferentes Actividades Mineras	Dr. Felipe Calizaya	Universidad de Utah, Departamento de Minas	USA
15	Estudio Psicométrico y Determinación de Cargas Térmicas	Jesús David Martínez ; Jorge Enrique Castellanos	Grancolombiagold	COLOMBIA
16	Actualización del plan de ventilación de la mina Fontanella	Arlito Alves Valente	VCS Engenharia e Consultoria	BRASIL
17	Ventilación inteligente a través de un sistema ciber-físico	Cristhian Jacinto ; Joan Quispe ; Harry Anacleto ; Alexis Baca	PUCP / MINEC S.R.L.	PERÚ
18	Propiedades termodinámicas y calibración de modelo térmico en mina Charcas	Jose Pablo Sanchez Gutierrez ; Jaime Albuern Perez	Universidad Autónoma De Zacatecas / We Mining	MÉXICO
19	CFD aplicado a las pérdidas singulares en túneles y ventiladores	Jose Pablo Sanchez Gutierrez ; Jaime Albuern Perez	Universidad Autónoma De Zacatecas / We Mining	MÉXICO
110	Implementación de un Sistema de Control de la Ventilación en la Mina San Rafael	Fabio Iván Huamán Medina	MINSUR S.A.	PERÚ

## Optimization of the ventilation circuits with the support of DMAIC methodology

UFMG, [alisson\\_engh@yahoo.com.br](mailto:alisson_engh@yahoo.com.br), +55 71 992468960 <sup>1</sup>  
UFMG, [rcandia@demin.ufmg.br](mailto:rcandia@demin.ufmg.br), +55 31991877636 <sup>2</sup>

### ABSTRACT

Brazilian mining has historically played an important role in economic cycles, with a direct correlation in the participation of the Brazilian gross domestic product (GDP) over the centuries. However, in recessions and with reduced price scenarios, it is essential to improve processes, to seek lower costs involved, making management concepts, operational excellence an integral part of the corporate organizational culture. This change in philosophy has become essential for survival and is due to the fact of the complexity of the operations, which convey the concept of zero waste.

The dissertation has as premise and objective to present solutions based on continuous improvement, low effort, high impact on actions, low investment. All opportunities will be carried out in an underground mine linked to the infrastructure sector and specifically mine ventilation. Opportunities for the application of continuous improvement of mine ventilation were researched, based on good practices and market research, based on the DMAIC methodology (Definition-Measurement-Analysis-Action-Control), seeking results with less waste, increased production and reduced operating costs. Focus will be given to the mine ventilation sector, where qualitative and quantitative losses will be analyzed that generate temperature increases in specific mining panels, resulting in interruptions in the mine operation and thermal discomfort for operators on the fronts. In addition to procedural improvements, it will seek simulations with the use of software that allow greater air flow optimization ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) for the mining fronts. The intention is to include these improvements, to reduce the impact of hours stopped by temperature in mining panels and to increase production in the mine.

*KEYWORDS: Mine Ventilation/ DMAIC Methodology/ Process Management/ Continuous Improvement.*

## **1. Introduction**

Underground mine ventilation has a direct and indirect role in safety, health and performance issues evaluated by the worker's income [1]. Underground environmental conditions influence operating performance, and in this way the implanted ventilation system must meet the required standards (NR-22/17/15) [2] & [3] mainly to temperature requirements. The objectives of a ventilation system are tied to the supply of air to workers in the necessary quantity and quality, diluting and making harmless toxic and explosive gases that occur in the underground environment, causing the removal of dust and gases at a sufficient speed, as well as moisture control [4].

The need for control of air quantity and quality increases with the deepening, expansion and complexity of the underground mine. The control of the ventilation circuit depends on knowledge: the functions to be performed, the principles that govern the behavior of gases and the planning methods of the projects ventilation systems that achieve the desired effect [5].

As in the whole process, in mining, the mine ventilation area presents opportunities for improvement. The losses in this area are large and by many imperceptible, unless stops occur e.g. by temperature rise. Among the factors that contribute to the increase in temperature, can be considered: air leakage (usually through curtains, sidings, doors, torn ducts), low capacity of installed fans, excess open/ploughed area, distance from the mining fronts to the main ventilation circuit, technical difficulty of regulating the fans, installation of fans outside the neutral point increasing the short circuit and crossing of air flow. [6]

Evaluating that losses and waste should be eliminated and/or minimized, and that no process is permanently adequate or correct indefinitely, a study was applied based on the Lean Six Sigma methodology, to the mine ventilation process, meeting the requirements of: low effort, high impact and low implementation cost, using the DMAIC methodology.

The abstract aimed to make operational improvements based on the DMAIC methodology in the mine ventilation process, aiming at increasing the hours available for the mining operation.

## **2. Theoretical description**

The Lean Six Sigma (LSS methodology) is focused on processes with quantitative steps, structured, disciplined and focused on improving the existing process with little or no investment. As the basis of its structure is based on the DMAIC method and statistical tools. The letter D means definition, in which the scope of the project is precisely defined, identifying the process that generates the problem, defining a global goal and drafting the project contract. The letter M means measurement, in which the collected data are processed quantitatively, evaluating the

potential causes in the process mapped and defining the focuses of the project [7]. The letter A means identifying the root causes of the problem with facts and data proving them. The letter I means improve (improvement/action) solutions are proposed, evaluating the risk of implementation, elaborating, and executing the defined action plan. The letter C means control, in which the results are measured and the mechanisms that ensure the sustainability of the improvements made and achieved are defined.

For a good assertiveness of the LSS program, the definition of projects is one of the most important activities of the implementation process. Well-selected projects will lead to rapid and significant results and, consequently, contribute to the success and consolidation of the Lean Six Sigma culture in the company. On the other hand, inadequate projects will imply absence or delay of results and frustration of all involved, which may determine the failure of the program in the organization, knowing the flowchart of the selection process is vital for the continuity and maturity of the projects [8].

### **3. Case Study**

The mine is in the central-east region of the state of Sergipe, in the municipality of Rosario do Catete, 45 km from the capital Aracaju, Brazil. The mine has its operation carried out by underground mining, being the extraction method carried out by room and pillar, with rectangular pillars usually of 30.0 x 35.0 m, with an average extraction rate of 40 %.

The current maximum vertical depth is approximately 650 meters and mining extension in deactivated panels of up to 7.3 km, operating through underground mining by six mining panels, with continuous mining and without the use of explosives. The product for sale is potassium chloride (KCl), and basically three types of products are

produced after mining and processing. In 2019 the productive losses (t) were 255.832 t of disassembled material in the mine, in which representing the losses by indicators (utilization, productivity and physical availability), it was verified that the

greatest deviations were: use (79 %), productivity (19 %) availability (2%), shown in Figure 1.

Of the total mining hours lost time in 2019, about 639 hours were due to temperature reasons, being considered an unplanned operational stoppage, in which it influenced productive and economic losses for the enterprise, as shown in Figure 1.

LOSS CALCULATION MEMORY			
<b>Financial Metrics</b>			
	Metric	Unit	2019
Planned	KCI Programmed Volume	kt	484,877
	Margin	US\$/t	244
<b>Technical Metrics</b>			
	Metric	Unit	2,019
Losses 2019	Hours stops at the mine by temperature	h	639
	ROM	t	22,595
	Content	%	25%
	Met. Recovery.	%	82%
	KCI	t	5,071
<b>Financial results 2019</b>			
	Item	Unit	2,019
Estimated Loss	Δ Revenue	US\$/t	1,233,735
	Δ Cost	US\$/t	0
	Δ EBITDA	US\$	1,233,735
	Δ Current Investment	US\$	0

Figure 1- Financial loss calculation.

One of the main problems that caused production losses in the mining process in the mine, refers to the temperature increase of the panel. In accordance with NR 15 Brazil, the on-site work regime is considered as a moderate scale, recommending that activities should always be done at temperatures below 31.1°C IBTUG, otherwise there will be an activity stoppage until the maximum allowed temperature equalization. Thus, it is necessary an effective verification of the places with temperature increase on the mining fronts. Figure 2 shows that two mining fronts, named: front 1(with an impact of 272 h) and front 2 (with an impact of 233 h), represented 80% of the downtime (h) due to temperature in 2019.

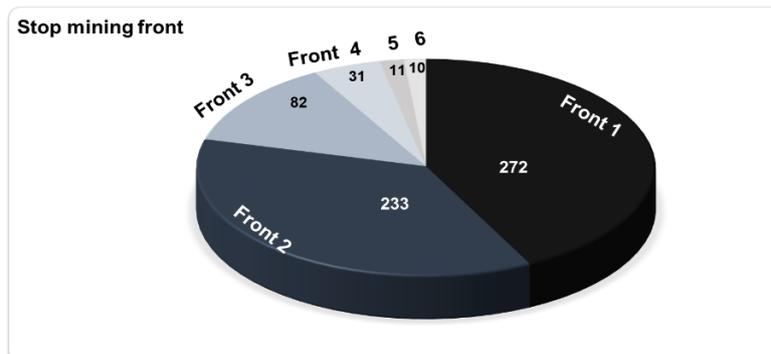


Figure 2- Mining front stop per hour in 2019.

The main indicator for the occurrence of mining front break-down refers to the increase in temperature  $\geq 31.1$  °C. In 2019 about 503 stops were in front mining 1 and 2 by temperature above those established by regulatory standards, representing an average of 42 h/month. Based on the sequencing of the choice of projects, it is verified that there is an opportunity to be worked on, and a project contract (Project Charter) containing the main information should then be carried out, as shown in Figure 3.

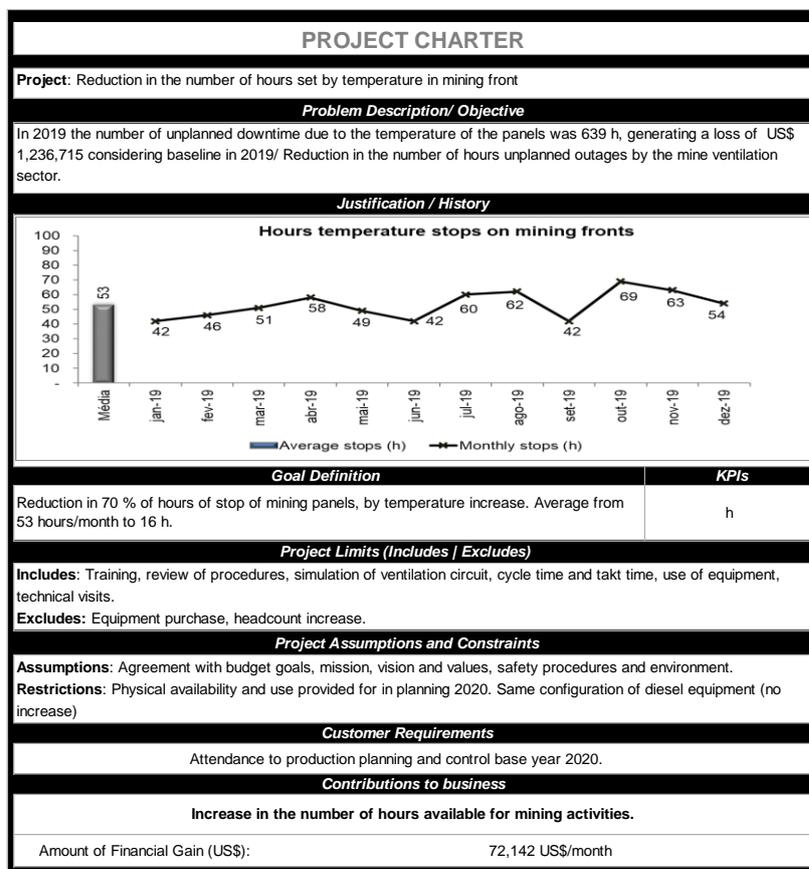


Figure 3-Project Charter to reduce the number of hours lost due to high temperature in mining panel.

As an exit in search of knowing the possible causes for the increase in the temperature of the mining fronts, it was carried out through the Ishikawa Diagram tool, as shown in Figure 4.

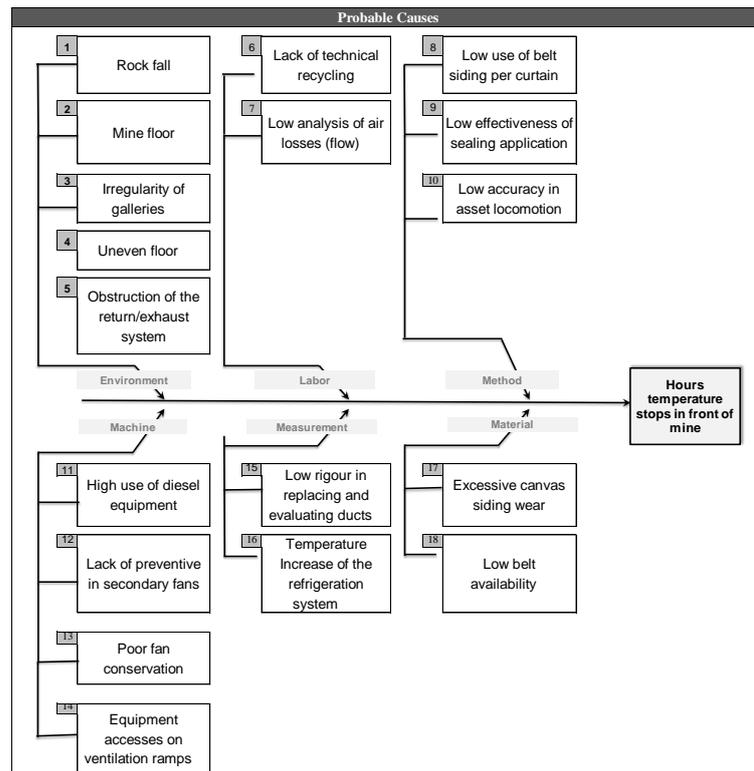


Figure 4- Ishikawa diagram for possible causes of the problem.

With the prioritization matrix tool was analyzed qualitatively, which problems tend to have the greatest impact on the opportunity/project and thus being done by priorities, according to Figure 5.

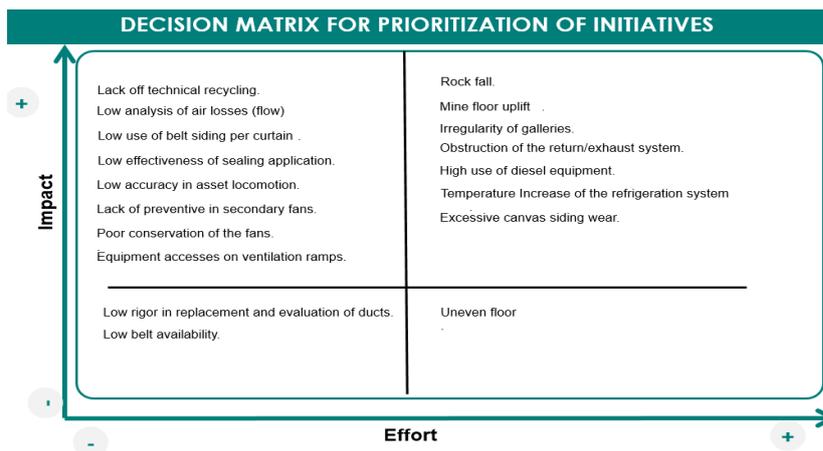


Figure 5- Prioritization quadrant for initiatives.

Following the DMAIC methodology, an action plan described in Table 1 was carried out. This action plan will run with five sequenced actions previously chosen by the prioritization matrix being chosen. All five causes will be evidenced

numerically and/or qualitatively, as proof of the action plan to be applied.

Table 1- Action plan for reduction of hours for ventilation.

<i>What</i>	<i>Why</i>	<i>How</i>	<i>How Much</i>	<i>Where</i>	<i>When</i>
Low analysis of air losses (flow)	Low simulation of air losses in the mine, and circuit optimization..	Simulation using VUMA software	US\$ 0	Main Ramp (RN2)	02/20/2020
Cleaning exhaust galleries	Reduce air recirculation (clean and contaminant)	Cleaning using LHD	US\$ 0	Main Ramp (RN2)	07/02/2020
Lack of measurement between isolated loss points	Low knowledge in the places (sleepers, curtains, doors) of higher losses	Analysis of air losses from the ventilation system to panels 1 and 2.	US\$ 0	Main Ramp (RN2)	04/27/2020
Low rigor in replacing and evaluating ducts	There is no technical and inspection evaluation for duct exchange	Performance of operational procedure, for analysis, maintenance and exchange of pipelines.	US\$ 0	Main Ramp (RN2)	05/28/2020
Equipment accesses on ventilation ramps	Equipment parked on ramps, reduce air speed for mining fronts	Removal of equipment from the main ramp, for parking to be created in the mine.	US\$ 0	Main Ramp (RN2)	05/02/2020
High Curtain Wear	Large number of curtains with malfunctions and not changed.	Replacement of worn curtains	US\$ 0	Main Ramp (RN2)	07/10/2020
Low use of belt siding per curtain	Belt sidings are better due to increased resistance against rock fall and floor upholding.	Geotechnical analysis of sites with higher rock deplanements and up construction in the mine, which require belt sidings instead of curtain.	US\$ 0	Main Ramp (RN2)	06/05/2020

## 4. Results and discussion

### 4.1 Redistribution of airflow in the mine

It was analyzed that the air flow of the mine ( $m^3/s$ ) was poorly sized, and this flow distribution did not meet the needs of the six mining fronts, even with nominal capacity to supply, according to Table 2.

Table 2- Simulated and required flow rate per mining front.

Flow				
Mining front	Area	Flow Measure (Kg/m <sup>3</sup> )	Flow Required (Kg/m <sup>3</sup> )	Diference (m <sup>3</sup> /s)
1	NE	22	26	-4
2	NE	19	24	-5
3	N	61	33	+28
4	N	72	23	+49
5	S	46	38	+8
6	S	64	45	+19
<b>Total</b>		<b>284</b>	<b>189</b>	<b>+95</b>

It is noted that there is about 95 m<sup>3</sup>/s to be distributed, and on the mining fronts 1 and 2, there is a required flow deficit. Thus, it was simulated through the VUMA software [9], an air redistribution system, in which the air flow would be redistributed to tend the six mining fronts, as shown in Figure 6.

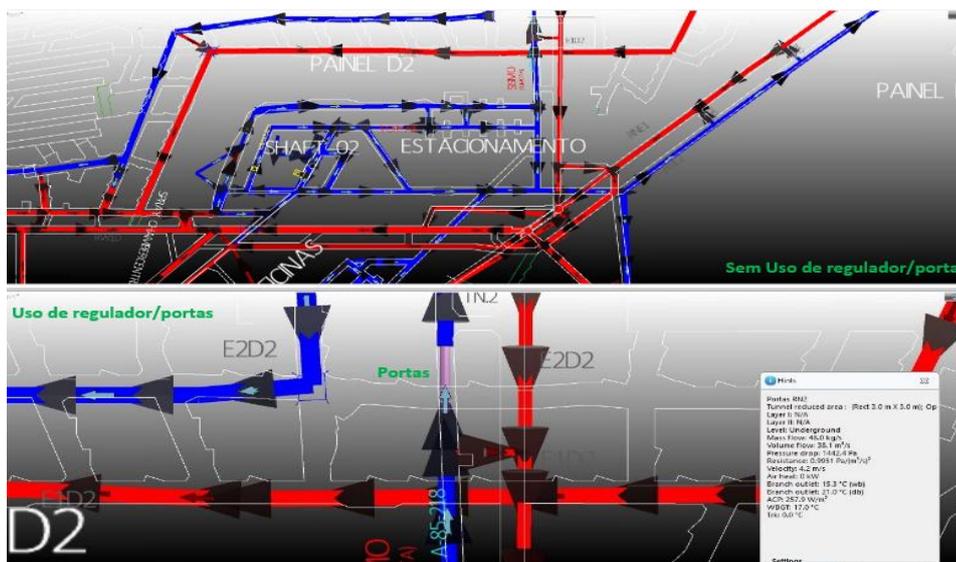


Figure 6- Current air flow simulation for mining panels 1 and 2 using regulators/doors

Table 3 demonstrated that with the use of airflow drivers and doors, there will be a redistribution of the ventilation circuits to increase the flow rates to fronts 1 and 2, and substantial reduction of air losses in the circuit.

Table 3- Flow simulation before the regulator and after the regulator (ideal redistribution).

Flow: (with regulator and doors)				
Mining front	Area	Flow Measure (Kg/m <sup>3</sup> )	Required (Kg/m <sup>3</sup> )	Diference (m <sup>3</sup> /s)
1	NE	42	26	+16
2	NE	36	24	+12
3	N	53	33	+20
4	N	43	23	+20
5	S	46	38	+8
6	S	64	45	+19
<b>Total</b>		<b>284</b>	<b>189</b>	<b>+95</b>

The action of air redistribution will be based on the simulation performed through the Vuma software, using application and installation of doors and regulators as shown in Figure 7.



Figure 7- (a) without air regulator; (b) application of regulator and doors for air redistribution

#### 4.2 Clearance of return galleries

It was seen that there are several points in the mine, with accumulation of material that obstructs the passage of air, which can cause: reduction of flow quantity in the airway, increase of air velocity, transfer of material to the nearby galleries by the barrier and possible recirculation of air in these roads. Thus, as a qualitative way, clearance was performed in exhaustion return accesses, to improve the output flow contaminated air in the mine, as shown in Figure 8.



Figure 8- (a) obstructed return gallery; (b) clearance of the return gallery.

### 4.3 Use of belt and brattice stoppings

One of the ways to effectively ensure the final control of the ventilation system is the regulation and redirection of airflow to the places of greatest demand. As part of these elements, usually in underground mines, is the use of curtains and stoppings (sidings), to ensure lower flow losses and air driver for the mining fronts. In this way, the simple canvas sidings were exchanged for belt sidings sealed with polyurethane foam as shown in Figure 9.



Figure 9- (a) belt siding sealed with polyurethane, (b) unsealed canvas siding.

### 4.4 Reduction of air losses in mine accesses

The mine air quantity losses (leakage) are above 35 %, and it is necessary to understand these deviations to develop corrective actions and improvement of the ventilation. The major faults are tied to air leakage through the access doors, air losses on the curtains and belt stoppings (sidings), floor openings and cracks. It was verified in one of the accesses of the mine, which within 300 m, the air losses

are

estimated at  $14 \text{ m}^3/\text{s}$ , as represented by Figure 10.

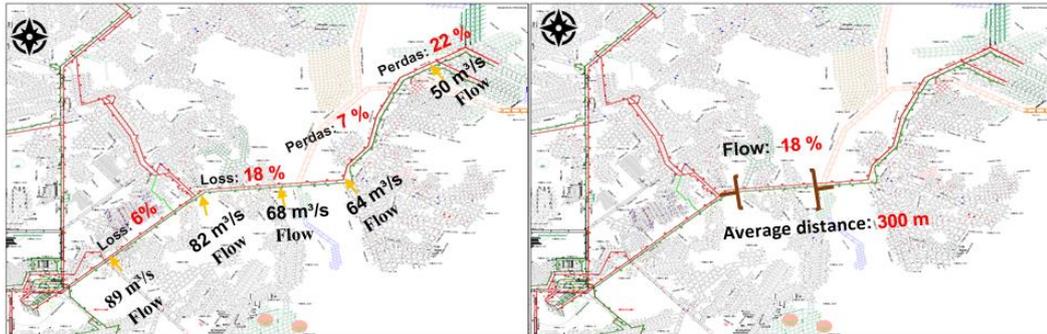


Figure 10- Mine air losses in one of the mining accesses.

To reduce air losses in the circuit, seals were applied to the ventilation circuit doors, according to Figure 11.



Figure 11- (a) air losses between doors; (b) application of seal on access doors to reduce air leaks.

Another factor that causes air loss in the circuit is the low quality of the seals in the brattice curtains and/or replacement by belt curtains with the use of polyurethane foam (sealant fixing material). The sealing was made in the curtains of the studied circuit, to evaluate the reduction of losses in a main access of the mine, as shown in Figure 12.



Figure 12- (a) unsealed curtains on the sides of the gallery; (b) curtains with seal on the edges of the gallery.

After completing the corrective scans in this part of the circuit, measurements were made to confirm whether the actions caused positive reactions to the circuit, as shown in Figure 13.

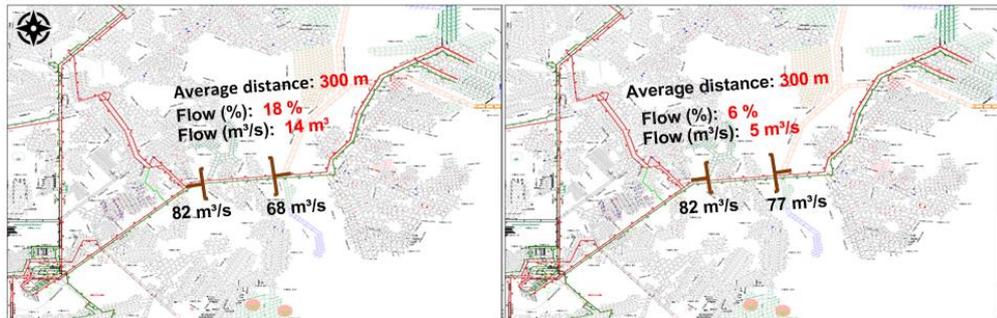


Figure 13- (a) air losses in the stretch before improvements; (b) air losses in the stretch after improvements.

#### 4.5 Gains from applied improvements

After the corrective actions were taken, it was verified that the temperatures in the mining fronts were reduced, demonstrating a positive effect on the installation of regulators and doors, obtaining a reduction of -87 % in the total time of stops due to temperature, as shown in Figure 14.

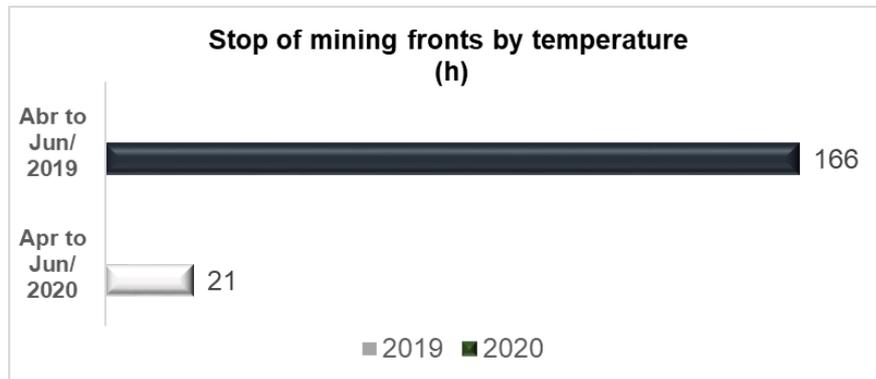


Figure 14- Comparison of the number of hours of mining panel stops by temperature during the quarter of 2019 and 2020

With the reduction of the number of hours of mining lost due to high temperature, a financial analysis was carried out, comparing the quarter from April to June 2019 and 2020, demonstrating an estimated financial return of US\$ 281,159, due to the greater availability of hours for mine operation, as visualized

by Figure 15.

RETURN CALCULATION MEMORY			Month		
Descrição		Unit	Apr	May	Jun
No Initiative DMAIC	Hours in stops on mining fronts (2019)	h	43	52	71
With initiative	Horas em paradas em frentes de lavra (2020)	h	11	16	9
<b>Financial Results:</b>					
Item		Unit	Apr	May	Jun
No Initiative DMAIC	Total Revenue	US\$ mil	11,322	11,322	11,322
With initiative DMAIC	Total Revenue	US\$ mil	11,391	11,4	11,455
Result	Δ Revenue□	US\$ mil	69	78	134
	Δ Cost□	US\$ mil	0	0	0

Figure 15- Financial calculation of return with reduction of the number of hours lost due to high temperature in mining panels.

## 5. Results and discussion

Through the analysis of losses due to unplanned stops, mine ventilation represented an impact of 639 hours/year on the availability of hours to be used in the mining operation process. These hours resulted in production losses of 22,596 t of ROM in 2019, equivalent to US\$ 1,236,715 per sale of the commercialized product, being important the creation of actions in short time and high impact, to reduce stops in the mining operation, minimizing the waste of available downtime, with the precepts of Lean Manufacturing.

The analysis of the supply and demand of the air flow for the mining panels, attested that the mine did not meet one of the Lean principles (waste), represented in this case by the air flow, in which it confirms that the current ventilation circuit does not meet the minimum flow requirements in two mining panels, and there is waste associated with Lean Manufacturing, such as: improper/improper processing and defects in the circuit and sizing of the mine ventilation circuit, and there is waste associated with Lean Manufacturing, such as: improper/improper processing and defects in the circuit and sizing of the mine ventilation circuit

The analysis of data related to the ventilation circuit in 2019, demonstrates that the minimum total flow rate was not supplied so as to reduce or eliminate break downs (stops) by temperatures in panels 1 and 2 where the required flow rate by NR

15 is 50 m<sup>3</sup>/s, and values measured in the field indicate a joint flow of 41 m<sup>3</sup>/s, making insufficient air flow for these sites. Current circuit losses due to leaks/air losses were above 30%, requiring corrective action to continuously improve the mine's ventilation system.

The simulation using the Vuma software demonstrated an equalization of the air flow in the six mining panels, using regulators and doors, in which the flow rates will be around 42 m<sup>3</sup>/s and 36 m<sup>3</sup>/s for panels 1 and 2, totaling 78 m<sup>3</sup>/s. The values measured in the field from April to June 2020 after the installation of the regulator were at 38 m<sup>3</sup>/s and 33 m<sup>3</sup>/s for the mining panels 1 and 2 with a joint flow of 71 m<sup>3</sup>/s, meaning a 91 % adherence between the field-measured and simulated data.

To reduce the losses of the ventilation circuit, qualitative improvements were made to minimize the losses and air leaks. Using this technique, the air leakage was minimized, resulting in an increase of 11 m<sup>3</sup>/s in a stretch of 300 meters of circuit, reducing the overall losses by 66.7%, proving that the optimization actions generate gains in the mine ventilation circuitous.

It was verified that with the redistribution of air in the mine, smaller interruptions in the mining operation were generated due to an increase in temperature, which provides longer time (h) for the mining operation. This is an important step for strategic planning for the years 2021 and 2022, that will reduce losses and air leaks in the circuit for optimization and improvement of the circuit.

The reduced temperature, compared to the permissible limits during the period from April to June/20, represents a reduction of 78 % in ventilation stops, and may generate an increase of 4,485 t of ROM, with revenue estimated at US\$ 281,159 related to the hours available and used for mining operation.

## Reference

- [1] Curi, A, Lavra de Minas, p.462, Oficina de Textos, São Paulo, Brasil (2017).
- [2] Ministério do Trabalho e Emprego, NR15- Atividades e Operações Insalubres. Ministério do Trabalho e Emprego. Acesso disponível <<http://www.mte.gov.br/temas/segsau/legislacao/normas/conteudo/nr15>>. [accessed.10. july.2020] (1978).
- [3] Ministério do Trabalho e Emprego, NR22- Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração. Ministério do Trabalho e Emprego. Acesso disponível <<http://www.mte.gov.br/temas/segsau/legislacao/normas/conteudo/nr22>>.

[accessed.23. august.2020] (1999).

[4] Hartman, H. L.; Mutmansky, J. M.; Ramani, R. V.; Wang, Y. J, p.791, Mine ventilation and air conditioning, Wiley Interscience (1991).

[5] Massanés, M.B, p.315. Some approaches to improve the ventilation system in underground potash mines. Thesis for the Doctor, University of Catalonia, Catalonia, Spain, p.315 (2015).

[6] COSTA, V. L, 137p, Análise via simulação da influência da temperatura na produtividade e nos custos de ventilação em mina subterrânea. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto (2019).

[7] Werkema, C, p.108, As ferramentas da qualidade no gerenciamento de processos, Fundação Christiano Ottoni (1995).

[8] Ohno, T, p.147, O Sistema Toyota de produção: além da produção em larga escala, Bookman (1997).

[9] VUMA. Software for the ventilation of underground atmospheres - Help function. (2019).

## APÊNDICE IV

Ref.: REDISTRIBUIÇÃO DA VAZÃO AR EM MINA SUBTERRÂNEA PARA AUMENTO DE HORAS DISPONÍVEIS EM OPERAÇÃO DE LAVRA

CLIMATIZADOR MÓVEL PARA MELHORIA OPERACIONAL DA TEMPERATURA EM MINA SUBTERRÂNEA

Prezado Autor,

Temos a satisfação de informar que os trabalhos em referência foram aprovados para apresentação no 10º CBMINA.

As informações sobre o tipo de apresentação, data, horário e local serão informadas posteriormente.

**A 10ª edição do CBMINA será 100% online e gratuita – exceto para os minicursos, que terão inscrição paga. A mesma deverá ser providenciada no site do evento.**

Estamos disponibilizando na área do autor o “**Termo de Compromisso de Apresentação do Trabalho**” que deverá ser enviado na própria área do autor ou pelos e-mail [cbmina2021@ibram.org.br](mailto:cbmina2021@ibram.org.br) ou [eticaeventos@gmail.com](mailto:eticaeventos@gmail.com) até o próximo dia 5 de abril.

Atenciosamente,

Cláudio Lúcio Lopes Pinto  
Coordenador Técnico

10º Congresso Brasileiro de Minas a Céu Aberto e Minas Subterrâneas - CBMINA

Envio de Trabalho ?

Dados Pessoais Trabalhos

Trabalhos Enviados						
ID	TÍTULO	TEMA	APRESENTADOR	HISTÓRICO	SITUAÇÃO ÚLT. ALTERAÇÃO	ARQUIVOS
124	Lean Manufacturing Aplicado À Ventilação de Mina	Ventilação de Mina Subterrânea		<a href="#">VISUALIZAR HISTÓRICO</a>	Aprovado   17/03/2021 - 19:43	<a href="#">Download do trabalho</a>
187	CLIMATIZADOR MÓVEL PARA MELHORIA OPERACIONAL DA TEMPERATURA EM MINA SUBTERRÂNEA	Ventilação de Mina Subterrânea	Alisson	<a href="#">VISUALIZAR HISTÓRICO</a>	Aprovado   23/03/2021 - 15:08	<a href="#">Download do trabalho</a>

**LIMITE E/OU DATA FINAL ATINGIDO.**

## CLIMATIZADOR MÓVEL PARA MELHORIA OPERACIONAL DA TEMPERATURA EM MINA SUBTERRÂNEA

Alisson Brasil, UFMG/CPGEM, alisson\_engh@yahoo.com.br

Renan Collantes Candia, UFMG/DEMIN, rcandia@demin.ufmg.br

### RESUMO

Um dos principais parâmetros para a continuidade operacional em uma mina subterrânea, é o fator temperatura nas frentes de serviços (°C). As atuais normas regulamentadoras para ambiente subterrâneo, expressam o limite aceitável para cada atividade laboral a ser considerada pela NR 15 [1]. Se o ambiente subterrâneo for inadequado poderá ocasionar desconforto, que sofre os efeitos fisiológicos como perda de interesse nas atividades, frequentes descansos, desejo de concluir a atividade rapidamente, redução do grau de concentração, afetando diretamente o fator da segurança operacional. Por vezes altas temperaturas podem inviabilizar atividades de sondagem, frentes de lavra, apoio. O estudo visa buscar formas de melhorar as temperaturas com uso de climatizadores móveis em frentes de serviço estratégicas, para viabilidade operacional e/ou melhorar as condições atuais.

**Palavras Chave:** Ventilação de Mina. Mina Subterrânea. Conforto Térmico. Sensação térmica.

### ABSTRACT

One of the main parameters for operational continuity in an underground mine is the temperature factor on the service fronts (° C). The current regulatory standards for the underground environment, express the acceptable limit for each work activity to be considered for NR 15 [1]. If the underground environment is inadequate, it can cause discomfort, which suffers physiological effects such as loss of interest in activities, frequent rest, desire to complete the activity quickly, reduction in the degree of concentration, directly affecting the operational safety factor. Sometimes high temperatures can prevent drilling activities, mining fronts, support. The study aims to seek ways to improve temperatures using mobile air conditioners on strategic service fronts, for operational feasibility and / or to improve current conditions.

**Key Words:** Mine ventilation. Thermal comfort. Thermal sensation.

## INTRODUÇÃO

Os desafios atuais das operações mineiras e em especial às minas subterrâneas estão se tornando gradualmente maiores. As minas estão se tornando cada vez mais profundas, exigindo cada vez mais trabalhos mecanizadas, e os requisitos legais (saúde, segurança e meio ambiente), se tornando cada vez mais exigentes, buscando uma maior sustentabilidade do processo e aumento da eficiência operacional para a maior recuperação mineral. Do ponto de vista de ventilação os efeitos principais da profundidade são o aumento do calor e da umidade, e aumento das condições de tensão prévia, obrigando ao aumento da sustentação das escavações. Esses fatores levam as empresas a concentrar sua atenção, esforços, tecnologias e recursos no controle da estabilidade das escavações e em eficientes sistemas de ventilação.

Um dos grandes problemas de minas subterrâneas se refere ao desconforto térmico que geralmente está atrelado à temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ). A literatura aponta mais de vinte e três fontes de calor em subsolo, destacando-se o fluxo geotérmico, motores a combustão, o uso de explosivos, a rede de iluminação, a oxidação de certos tipos de minério, a infiltração de águas termais, movimentação do maciço, a rede de ar comprimido e a presença de grande número de trabalhadores em certos tipos de lavra, são algumas das fontes de calor características de uma lavra em subsolo (Gancev, 2006) [1].

O trabalho em ambientes subterrâneos exige alguns procedimentos para garantia das condições mínimas de segurança e saúde para. A exposição prolongada do colaborador as condições térmicas desfavoráveis conduzem inevitavelmente ao aumento de temperatura, produzindo efeitos fisiológicos que reduzem o rendimento e podem até provocar a morte (Torres e Gama, 2005) [2]. O metabolismo humano é acompanhado pela geração de calor, com o que a temperatura do organismo se mantém próximo a  $36,9^{\circ}\text{C}$ , e em contato com a temperatura do ar circundante o homem poderá sentir sensação de frio ou calor e os efeitos fisiológicos de baixas e altas temperaturas.

(Hartmann, 2006) [3] relata que os efeitos das condições de temperatura e umidade inadequadas tornam os operários menos conscientes dos sinais visuais ao seu redor e essas reduções levam eventualmente a um ponto em que o déficit de atenção compromete a segurança e a saúde dos trabalhadores com o aumento do potencial para acidentes graves. Quando uma pessoa é exposta a uma temperatura superior à de conforto, esta sofre os efeitos fisiológicos como por exemplo: perda de interesse nas atividades que realiza, frequentes descansos ou folgas, desejo de concluir o serviço rapidamente, irritabilidade, redução do grau de concentração, falta de sentido e de atenção e até a morte.

A norma regulamentadora NR15 [4], mostra um limite aceitável para IBUTG, no qual depende do tipo de atividade laboral (leve, moderada ou pesada), afetando diretamente a taxa metabólica do calor gerado pelo corpo. A exposição prolongada do homem em condições térmicas desfavoráveis conduz inevitavelmente ao aumento da temperatura no organismo e como consequência produz efeitos fisiológicos que reduzem seu rendimento. A norma regulamentadora pela NR 17 [5], expressa a temperatura efetiva devendo estar entre  $20^{\circ}\text{C}$  e  $28^{\circ}\text{C}$  para que o trabalho seja executado na melhor forma possível. (Costa, 2019) [6] cita que a partir de uma determinada faixa de temperatura, o rendimento do trabalhador diminui de

forma rápida, chegando a doenças ou acidentes como mostrado na Figura 1.

Este trabalho avalia testes de climatização para o ambiente de trabalho, em mina subterrânea em relação à redução de temperatura, operando com o uso de climatizadores móveis. O objetivo é a redução da temperatura nominal em frentes de serviço com a utilização de protótipos adaptados e específicos para esta finalidade.

## METODOLOGIA

A determinação da temperatura é o principal ponto a ser verificado para as frentes de lavra relacionado ao desconforto térmico nas frentes de lavra e da exposição de calor no qual os trabalhadores estão expostos, em que no Brasil adota-se o índice IBTUG. O Índice de temperatura de bulbo úmido termômetro de globo (IBTUG) foi desenvolvido inicialmente como um método simples para avaliar sobrecarga térmica em contingentes militares. Esse índice também permite o cálculo de períodos adequados de trabalho-descanso, no caso em que o índice ultrapasse os limites estabelecidos.

As temperaturas podem ser coletadas com o anemômetro devidamente calibrado adotando para isso procedimento e pontos de coletas. Para um controle adequado do balanço da ventilação, devem-se posicionar pontos de medida no circuito principal, dividindo-o em seguimentos. Assim pode-se determinar as fugas existentes em cada trecho do circuito, bem como a perda de carga associada. Outra medida importante é medir-se a vazão volumétrica na entrada e saída da ventilação nos painéis em lavra, verificando-se, assim, a possibilidade de recirculação de ar dentro do painel (Pinto, 2006) [7]

O procedimento para medição das variáveis de conforto térmico sugerido pela (Fundacentro,2005) [8] diz que as avaliações devem ser feitas de forma a cobrir todo o ciclo de trabalho, caracterizando cada situação de exposição do trabalhador. As leituras de temperatura devem ser iniciadas após vinte e cinco minutos de estabilização do conjunto com o ambiente, sendo realizadas, no mínimo, três leituras. As leituras obtidas não devem diferir em  $\pm 0,1$  °C, sendo realizadas tantas leituras quanto for necessário, para que as diferenças entre as três últimas leituras. A Figura 1 esquematiza a forma adotada de medição de temperatura nas frentes de lavra.

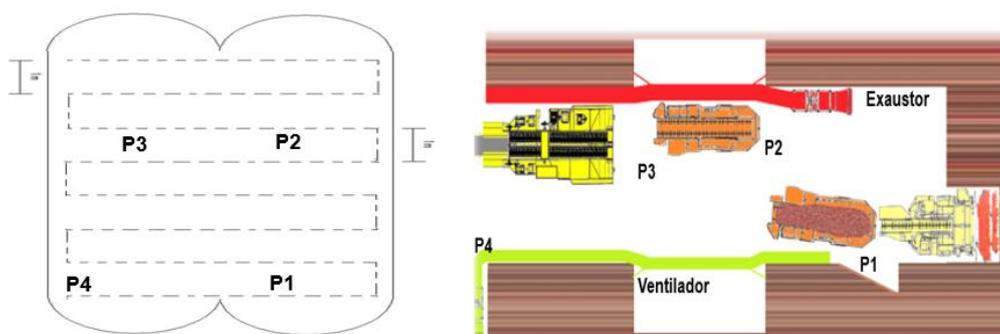


Figura 1- Pontos adotados para medição de temperatura na mina em estudo

(contribuição do autor, 2020).

As avaliações de temperatura são demonstradas pelo fluxograma da Figura 2. Neste fluxograma são inseridas as rotas processuais de avaliação em campo pela equipe e principais medidas corretivas e avaliações caso seja necessário com temperatura  $\geq 31,1$  °C.

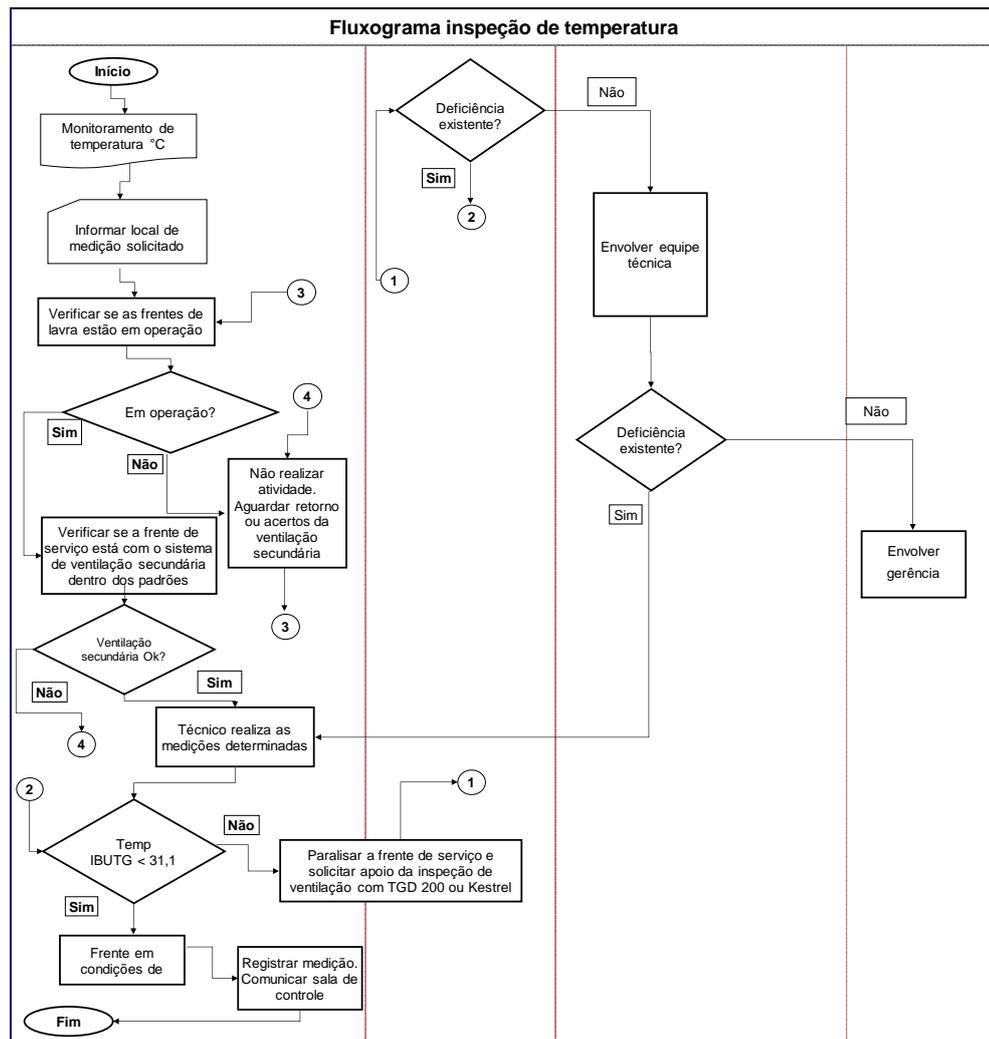


Figura 2- Procedimento para medição da temperatura em campo (contribuição do autor, 2020).

Foram realizadas medições de temperatura IBTUG (°C) em determinado ponto de sondagem denominado sonda K, durante o período de 01/03/20 a 31/09/20, e após instalação de climatizadores pelo período de 01/10/20 à 10/11/20. A escolha da sondagem para testes, deve-se as condições de menor mobilização de equipamentos para prover maior agilidade aos testes. Foi adotado para redução da variabilidade do teste, o mesmo local de sondagem na mina.

## Estudo de Caso

A mina do estudo está situada na região centro-leste do estado de Sergipe, no município de Rosário do Catete, distando 45 km da capital Aracaju, sendo sua operação realizada por lavra subterrânea e método de extração por câmaras e pilares (*room and pillar*). O ciclo operacional, tanto para estéril quanto para o minério, é composto por: desmonte mecânico por minerador contínuo, carregamento e transporte por *shuttle car*, fragmentador primário tipo *feeder breaker*, transporte por correia transportadora e içamento de material por sistema de poço.

Com a crescente ativa descoberta da mina e longevidade da mesma, novas áreas anteriormente não mapeadas pelo planejamento estratégico de longo prazo, estão entrando em desenvolvimento, no qual que inclui frentes/painéis de lavra painéis e áreas de sondagem. Com a expansão da mina, demanda um maior suporte para às avaliações á infraestrutura, destacando-se o suprimento de ar, para manutenção das temperaturas admissíveis.

A legislação estabelece valores limite de tolerância para agentes ambientais do ar, tais como gases, vapores, poeira mineral e condições de temperatura ambiente. Além das normas reguladoras de mineração, há a Portaria 237 da ANM datada de 19 de outubro de 2001, capítulo 6. Em geral todas estas normas regulamentadoras (NR 15 e 22) estabelecem que o sistema de ventilação deve atender pré-requisitos básicos como:

- ✓ Suprimento de oxigênio mínimo de pelo menos 2 m<sup>3</sup>/s por pessoa e equipamentos.
- ✓ Renovação contínua de ar.
- ✓ Diluição eficaz de gases inflamáveis ou nocivos e de poeiras do ambiente de trabalho.
- ✓ Temperatura e umidade adequadas ao trabalho humano.
- ✓ Operação de modo contínuo e operante.
- ✓ Localização, vazão e pressão dos ventiladores principais
- ✓ Direção e fluxo de ar.
- ✓ Localização e função de todas as portas, barricadas, cortinas, diques, tapumes e outros dispositivos de controle do fluxo de ventilação.

As condições subterrâneas, às quais os funcionários são submetidos podem produzir um metabolismo desequilibrado e, por esta razão, têm que ser controladas. Um dos principais parâmetros é a IBUTG °C (índice de bulbo úmido – termômetro de globo - obtida pela equação 1, de acordo com a Norma Regulamentadora 15 da Portaria 3.214/78, que estabelece que a exposição ao calor dever ser avaliada através do "Índice de bulbo úmido – termômetro de globo" (Ministério do trabalho e

emprego, 1978).

$$IBUTG = 0,7tbn + 0,3tg \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (1)$$

Em que:

- ✓ tbn: Temperatura de bulbo úmido natural (em  $^\circ\text{C}$ ).
- ✓ tg: Temperatura de globo (em  $^\circ\text{C}$ ).
- ✓ tbs: Temperatura de bulbo seco (em  $^\circ\text{C}$ ).

A norma regulamentadora NR15, estabelece as atividades e condições insalubres, na qual define atividades ou operações insalubres no ambiente de trabalho acima dos limites de tolerancia. Pela mesma norma, um limite aceitável para IBUTG varia e é dependente do tipo de atividade laboral praticada (leve, moderada ou pesada), já que afeta diretamente a taxa metabólica do calor gerado pelo corpo. Se o ambiente subterrâneo for inadequado para remover esse calor a temperatura do corpo aumentará, ocasionando desconforto que sofre os efeitos fisiológicos expressos da seguinte forma: perda de interesse nas atividades que realiza, frequentes descansos ou folgas, desejo de concluir a atividade rapidamente, irritabilidade, redução do grau de concentração, falta de sentido e atenção, câibras de calor e até a morte.

A exposição prolongada do homem em condições térmicas desfavoráveis conduz inevitavelmente ao aumento da temperatura no organismo e como consequência produz efeitos fisiológicos que reduzem seu rendimento. (Costa, 2019) cita que a partir de uma determinada faixa de temperatura, o rendimento do trabalhador diminui de forma rápida, influenciando diretamente o rendimento do trabalhador

Nas situações de trabalho (leve, moderada, pontuada) a norma brasileira pontua limites de tolerância para exposição à temperatura, em regime de trabalho contínuo, descanso no próprio local de prestação de serviço e/ou atividade somente com medidas adotadas mitigadoras de controle, conforme Tabela 1.

Tabela 1- Regime de trabalho e temperatura em função da temperatura de globo.

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

Foram coletadas as medições de temperatura IBUTG (°C) e analisadas os valores de temperatura pelo período de 01/03/20 a 30/09/20 na área da sondagem K, obedecendo à premissa de vazão constante próxima de 22 m³/s neste local. A Figura 3 mostra a variação durante os meses e Tabela 2, demonstra a média pelo período.

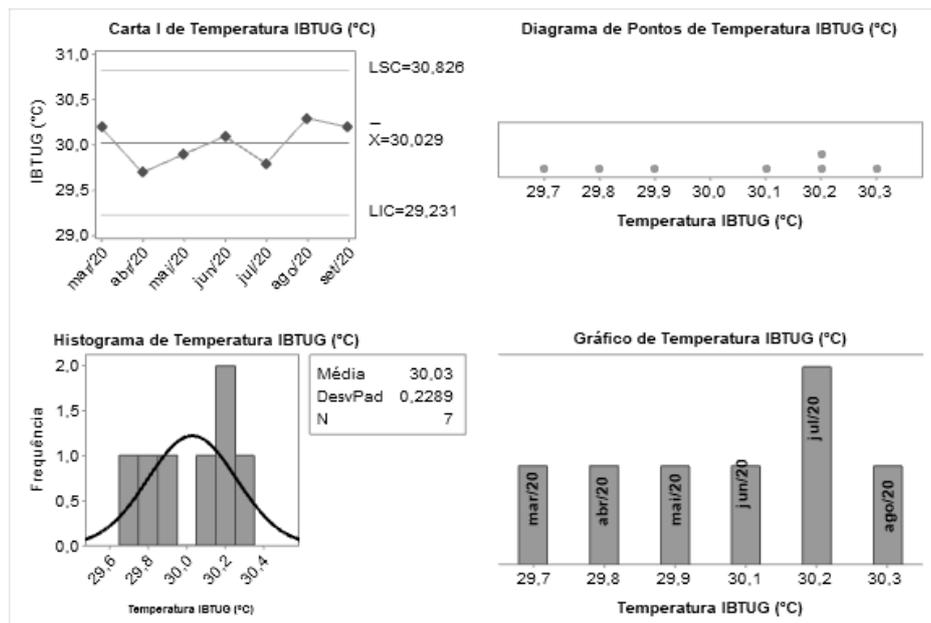


Figura 3- Estatística da temperatura antes do teste do climatizador.

Tabela 2- Estatística das temperaturas antes dos testes dos climatizadores.

Variável	Média	Desv. Pad.	Variância	Mínimo	Máximo	Amplitude
Temperatura IBTUG (°C)	30,03	0,23	0,05	29,70	30,30	0,60

Observa pelas coletadas realizadas que a temperatura média foi de 30°C, estando abaixo da NR15, na qual preconiza trabalhos inferiores a 31,1°C.

Através de um protótipo disponível no mercado foi analisado a instalação de um climatizador móvel, na qual estaria acoplado ao sistema de ventilação secundário. O princípio de funcionamento se baseia na troca do resfriamento evaporativo, no qual o próprio ar cedendo calor sensível para a água umidificar. Na passagem do ar pelo climatizador da colmeia, há a troca de calor entre a água e o ar. A água que evapora garante uma maior umidade do ar resfriado, sendo reposta água, por uma boia que mantém o nível do reservatório constante, conforme Figura 4.

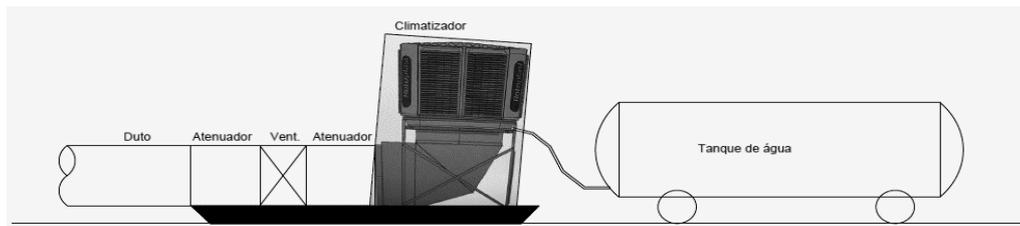


Figura 4- Protótipo de climatizador móvel.

## DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A instalação do climatizador para a sua devida confirmação de eficácia, deve ser levado como pontos principais: a redução da temperatura nominal e manutenção dos parâmetros anteriores do local de trabalho, como por exemplo estabilidade do maciço e minimização de deslocamento de rocha em virtude da presença de água.

A instalação foi realizada no dia 01/10/20, em uma das áreas da sondagem/exploração, devido a menores deslocamentos do protótipo, que poderiam ter em virtude da movimentação dos ventiladores nas frentes de lavra, conforme Figura 5.



Figura 5- Instalação do climatizador acoplado ao ventilador secundário.

Após a instalação do climatizador foram realizadas as coletas de medição de temperatura com uso do psicrometro, mantendo sempre a continuidade operacional do teste, para a estabilização da temperatura no ambiente com o climatizador, dutos de ventilação, grau geotérmico da rocha, equipamentos. A Figura 6 nos mostra os dados coletados de temperatura durante o período, a Tabela 3 as médias encontradas.

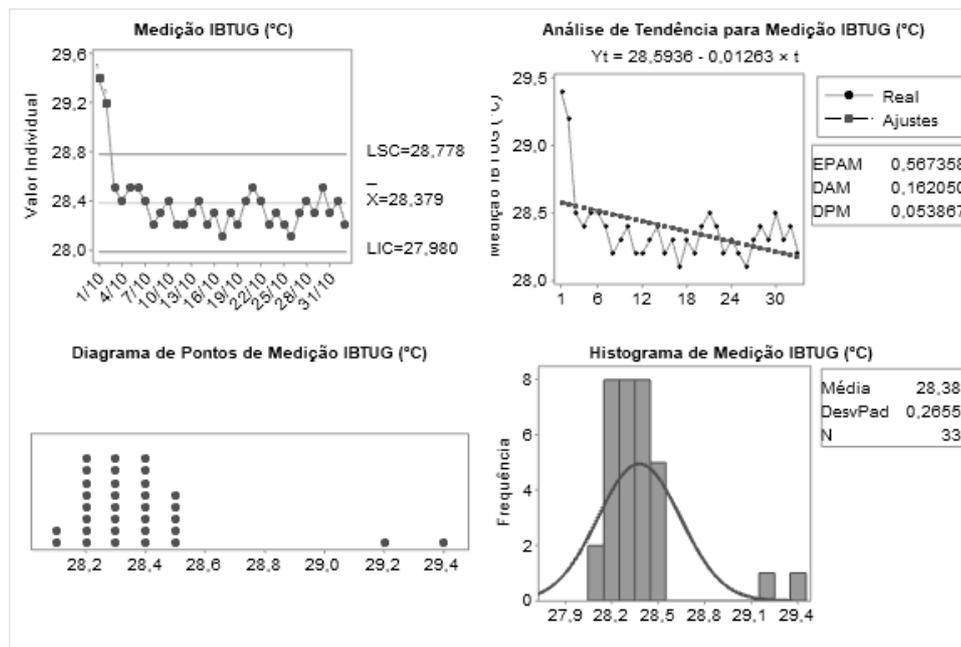


Figura 6- Estatística da temperatura após do teste do climatizador.

Tabela 6- Estatística das temperaturas após o teste dos climatizador.

Variável	Média	Desv. Pad.	Variância	Mínimo	Máximo	Amplitude
Temperatura IBTUG (°C)	28,40	0,27	0,35	28,10	29,40	1,30

Verifica-se que o uso do climatizador resultou em redução da temperatura média em  $-1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , uma redução percentual de  $-5,33\%$  na temperatura antes dos testes. A partir do gráfico desenvolvido por Poulton, 1970 e citado por Manassés, em função da média da temperatura o rendimento do operador estaria em  $90\%$  antes do uso e  $96\%$  após o uso do climatizador, conforme Figura 4.

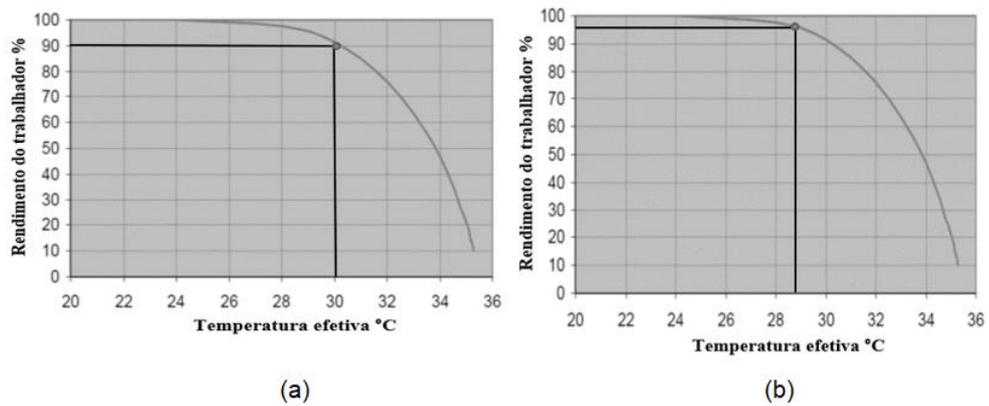


Figura 4- (a) rendimento do trabalhador antes do climatizador; (b) rendimento do trabalhador após uso do climatizador (Poulton, 1970, citado por Massanés, 2015).

A análise qualitativa sobre a sensação e conforto térmico da temperatura junto aos envolvidos na operação, foi realizada antes e depois dos testes. Para o questionário antes do teste, foram computados 2.000 votos, 37 funcionários, por 4 turnos ininterruptos, sendo analisados pela Figura 5 para a avaliação antes dos climatizadores.

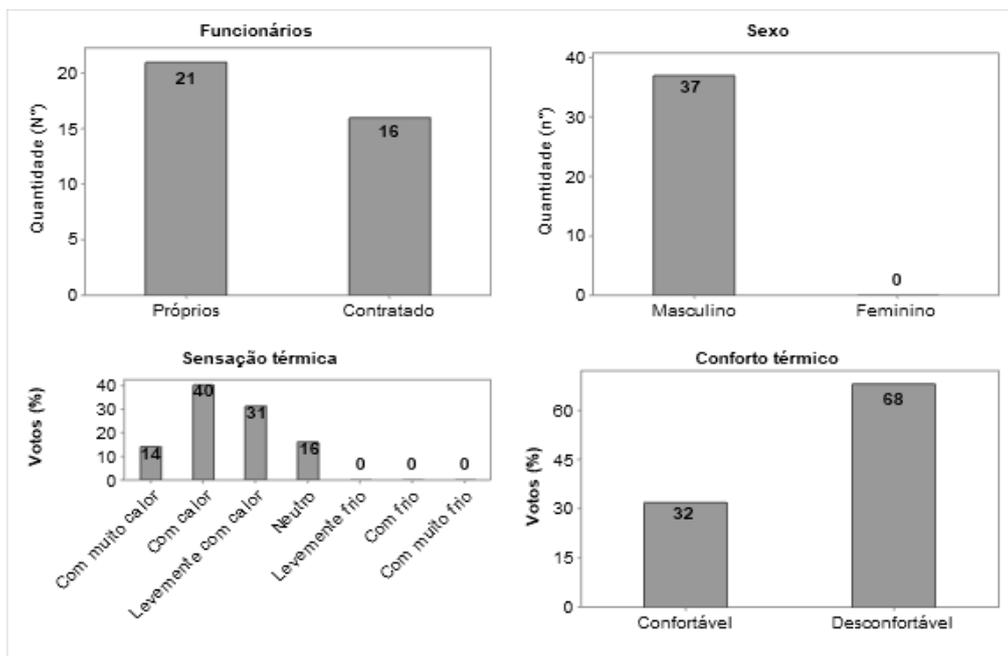


Figura 5- Questionário sobre sensação térmica na mina, antes dos testes com climatizador

Pelo gráfico observa-se que a sensação de calor (com muito calor, com calor e levemente com calor) está em 84 %, e o conforto térmico como desconfortável em 68 %, às atividades habituais desempenhadas pela sondagem.

Com os testes do climatizador em curso, foram realizadas 1.625 votos de pesquisa,

com 37 funcionários, em 4 turnos ininterruptos durante os testes com climatizadores. Pelo gráfico observa-se que a sensação de calor (com muito calor, com calor e levemente com calor) está em 43 %, e o conforto térmico em 16 % como desconfortável às atividades habituais desempenhadas pela sondagem, observado pela Figura 6.

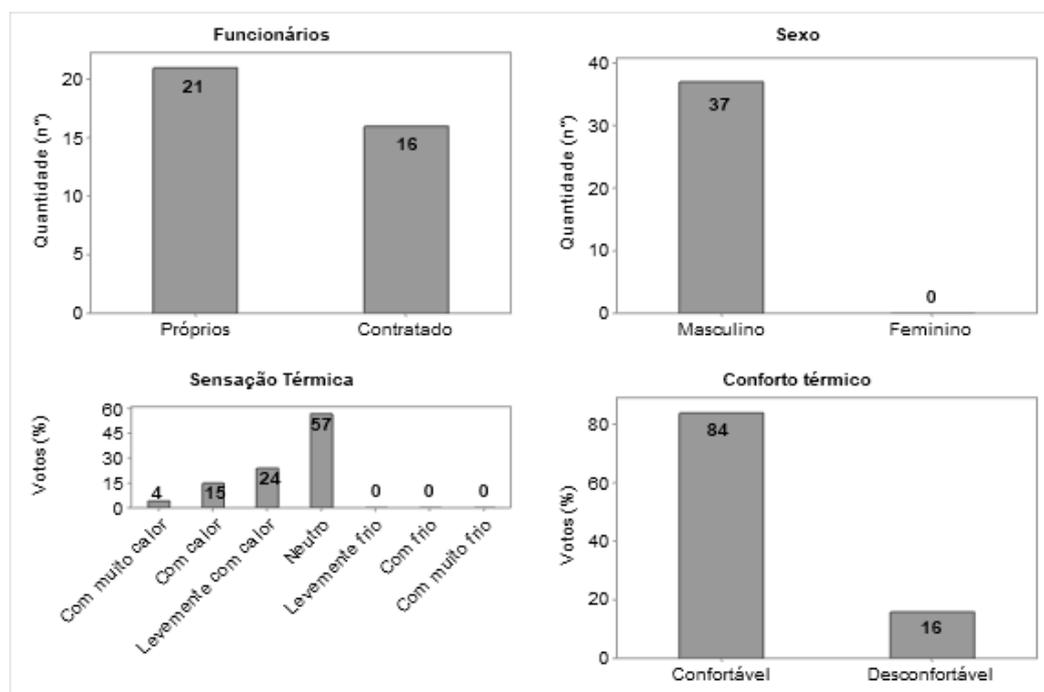


Figura 6- Questionário sobre sensação térmica na mina, durante testes com climatizador.

Nota-se uma melhora significativa da sensação térmica de neutro em +41 %, e o conforto térmico uma melhoria percentual de + 62 %, em relação ao questionário qualitativo com o uso dos climatizadores.

## CONCLUSÃO

O estudo mostra a importância em se buscar formas de melhoria do conforto e sensação térmica ao rendimento do trabalhador em uma mina subterrânea. Foi verificado que o uso de climatizadores móveis em uma determinada área da mina, resultou em redução média de 1,6°C (-5,33 %) na frente de serviço considerando o mesmo layout, vazão e equipamentos. A partir do gráfico desenvolvido por Poulton, 1970, em função da média da temperatura o rendimento do operador estaria em 90 % antes do uso, e 96 % após o uso do climatizador, que gera melhoria na frente de serviço utilizado.

Foram feitas pesquisas visando avaliar qualitativamente a melhoria do uso de climatizador. Com as pesquisas realizadas, verifica-se uma melhoria da sensação térmica considerada como calor (com muito calor, com calor e levemente com calor) de 84 % para 43 % em relação aos votos percentuais, e o conforto térmico considerado como desconfortável de 68 % para 16 % em relação aos votos percentuais, o que reforça a análise quantitativa dos testes.

O estudo traz como uma das possibilidades confirmadas: incremento e melhoria de frentes de serviço relacionado à temperatura (sondagem e/ou frentes de lavra), tendência à uma maior jornada de trabalho atendendo à NR15, e viabilidade operacional de exploração em áreas com temperaturas próximas ao limite admissível, podendo ser uma fonte de melhoria para redução de temperatura em frentes de lavra e sondagem.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Gancev, B. F. Avaliação de condições de qualidade do ar em mina subterrânea [monografia]. São Paulo: Universidade De São Paulo. 2006.
2. Torres, V.F.N. Engenharia ambiental subterrânea e aplicações. 1.ed. Rio de Janeiro: CETEM/CYTED, 2005. 550p.
3. Hartman, H.L. (1982). Mine ventilation and air conditioning. Wiley Interscience, v.2, p.3-67
4. Ministério do Trabalho e Emprego. (1999). NR15- Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração. Ministério do Trabalho e Emprego. Acesso disponível < <https://www.gov.br/trabalho/pt-br/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-15-anexo-12.pdf>>. Data de acesso: 11/10/2020.
5. Ministério do Trabalho e Emprego. (1978). NR15- Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração. Ministério do Trabalho e Emprego. Acesso disponível <<http://www.mte.gov.br/temas/segsau/legislacao/normas/conteudo/nr22>>. Data de acesso: 11/10/2020.
6. Ministério do Trabalho e Emprego. (1978). NR17- Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração. Ministério do Trabalho e Emprego. Acesso disponível < <https://sit.trabalho.gov.br/portal/index.php/ctpp-nrs/nr-17?view=default>>. Data de acesso: 14/11/2020.
7. Costa, V. L. Análise via simulação da influência da temperatura na produtividade e nos custos de ventilação em mina subterrânea. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2019. 137p. Dissertação De Mestrado. (Tese, Programa de Pós-Graduação Em Engenharia Mineral).
8. Pinto, P. C. Construção de modelos computacionais de redes de fluxo para circuitos de ventilação de minas em subsolo. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, 2004.193p. (Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação Em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais).

## ANEXO I- Configuração Ventilador NSC

Branch editor >> Fans

General Detail Image

Library fan NSC

Fan curve Default

Curve type Static  Fix flow  Quick edit

**Fan status**

Fan on  Fan resistance

Fan speed ratio 90 % 1296\* RPM

**Fan configuration**

Multiple fan configuration

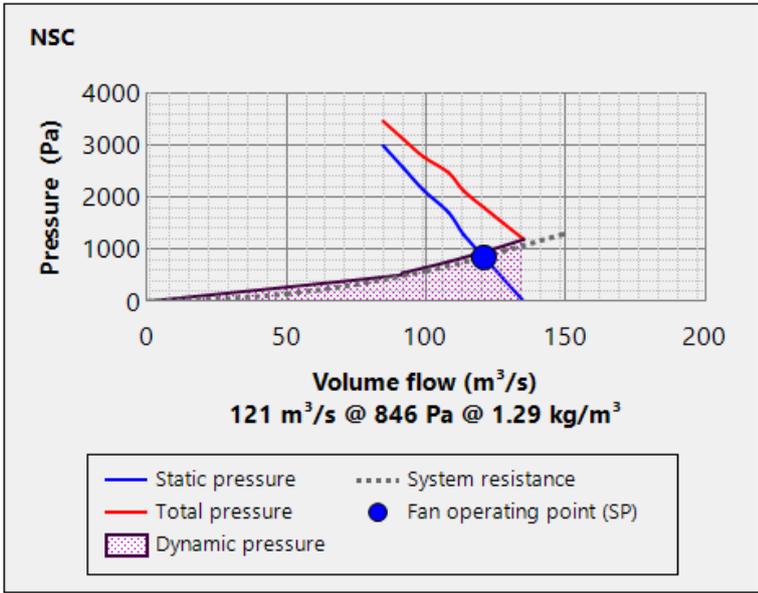
No of fans 2

Series  Parallel

**Icon**

**NSC**



121 m<sup>3</sup>/s @ 846 Pa @ 1.29 kg/m<sup>3</sup>

— Static pressure      - - - - System resistance  
 — Total pressure      ● Fan operating point (SP)  
 ■ Dynamic pressure

OK  Make default  Review   Cancel

## ANEXO II- Configuração Ventilador CSC

Branch editor >> Fans

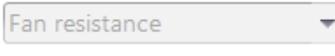
General Detail Image

Library fan: CSC

Fan curve: Default

Curve type: Static  Fix flow  Quick edit

**Fan status**

Fan on  Fan resistance: 

Fan speed ratio: 100 % 1440\* RPM

**Fan configuration**

Multiple fan configuration

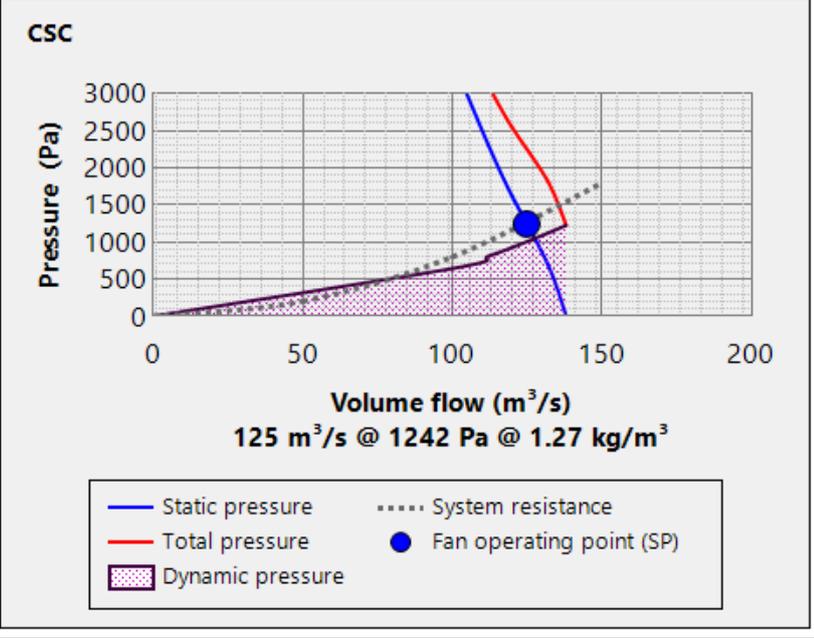
No of fans: 2

Series  Parallel

**Icon**

**CSC**



Pressure (Pa)

Volume flow ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

125  $\text{m}^3/\text{s}$  @ 1242 Pa @ 1.27  $\text{kg}/\text{m}^3$

— Static pressure      ..... System resistance  
 — Total pressure      ● Fan operating point (SP)  
 ■ Dynamic pressure

OK  Make default  Review   Cancel

## ANEXO III- Configuração Ventilador NEUS

Branch editor >> Fans

General Detail Image

Library fan: Neu fans

Fan curve: Default

Curve type: Static Fix flow Quick edit

**Fan status**

Fan on Fan resistance:

Fan speed ratio: 100 % 1440\* RPM

**Fan configuration**

Multiple fan configuration

No of fans: 2

Series  Parallel

**Icon**

**Neu fans**

Pressure (Pa)

Volume flow ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

237  $\text{m}^3/\text{s}$  @ 3317 Pa @ 1.21  $\text{kg}/\text{m}^3$

— Static pressure      ..... System resistance  
 — Total pressure      ● Fan operating point (SP)  
 ■ Dynamic pressure

OK Make default Review Cancel

## ANEXO IV- Coleta de dados após instalação do regulador e portas dos painéis 1 e 2

Painel De Lavra 01				
Data	Vazão	Temp. úmida	Temp. seca	Temp.IBUTG
1/4	41,9	25,6	39,8	29,9
2/4	29,5	26,1	40,1	30,3
3/4	39,6	25,8	39,6	29,9
4/4	38,6	25,3	39,3	29,5
5/4	38,2	24,7	39,6	29,2
6/4	38,2	25,4	40,2	29,8
7/4	37,1	25,5	39,6	29,7
8/4	41,0	25,9	39,6	30,0
9/4	43,5	25,7	40,9	30,3
10/4	37,1	25,3	39,1	29,4
11/4	41,6	24,8	38,8	29,0
12/4	31,6	25,7	40,3	30,1
13/4	29,6	26,7	40,2	30,8
14/4	27,3	25,5	39,2	29,6
15/4	44,5	24,9	39,2	29,2
16/4	44,5	24,1	39,6	28,8
17/4	37,1	24,9	39,6	29,3
18/4	27,3	26,3	39,8	30,4
19/4	37,1	25,3	39,6	29,6
20/4	37,1	24,7	39,2	29,1
21/4	28,2	24,6	39,5	29,1
22/4	41,0	25,0	39,4	29,3
23/4	43,5	24,9	40,2	29,5
24/4	41,0	25,3	39,6	29,6
25/4	43,5	25,8	39,4	29,9
26/4	37,1	24,3	40,1	29,0
27/4	49,7	25,8	39,5	29,9
28/4	45,5	25,6	39,3	29,7
29/4	43,5	25,1	39,0	29,3
30/4	39,7	25,9	38,8	29,8
<b>Média</b>	<b>39,1</b>	<b>25,4</b>	<b>39,6</b>	<b>29,6</b>

Painel De Lavra 02				
Data	Vazão	Temp. úmida	Temp. seca	Temp.IBUTG
1/4	35,5	25,1	39,4	29,4
2/4	33,6	25,2	41,5	30,1
3/4	35,8	25,6	40,2	30,0
4/4	35,7	23,1	34,2	26,4
5/4	36,0	24,8	39,7	29,3
6/4	34,4	25,8	38,1	29,5
7/4	30,0	26,7	39,2	30,5
8/4	35,0	25,1	38,9	29,2
9/4	32,6	25,4	41,6	30,3
10/4	30,1	25,2	40,4	29,8
11/4	32,9	25,7	41,0	30,3
12/4	31,0	24,8	40,8	29,6
13/4	41,6	24,5	39,9	29,1
14/4	32,8	25,7	38,9	29,7
15/4	32,9	24,5	40,7	29,4
16/4	33,8	25,8	41,0	30,4
17/4	30,3	26,0	41,3	30,6
18/4	32,9	25,5	39,4	29,7
19/4	30,9	25,0	39,3	29,3
20/4	31,8	25,2	39,4	29,5
21/4	30,9	25,9	39,7	30,0
22/4	30,1	25,4	40,5	29,9
23/4	29,3	24,8	39,3	29,2
24/4	30,8	24,6	38,8	28,9
25/4	32,3	24,9	39,2	29,2
26/4	30,1	24,3	40,1	29,0
27/4	37,1	25,1	41,2	29,9
28/4	30,1	24,8	39,7	29,3
29/4	31,6	25,3	40,6	29,9
30/4	29,8	26,2	41,0	30,6
Média	32,5	25,2	39,8	29,6

Painel De Lava 01				
Data	Vazão	Temp. úmida	Temp. seca	Temp.IBUTG
1/5	34,2	25,2	40,6	29,8
2/5	35,5	25,6	40,2	30,0
3/5	37,2	25,2	38,6	29,2
4/5	38,1	26,0	40,2	30,3
5/5	37,1	25,6	40,5	30,1
6/5	39,0	25,8	40,2	30,1
7/5	37,0	24,8	39,6	29,2
8/5	39,1	24,7	39,5	29,1
9/5	38,7	25,2	40,2	29,7
10/5	35,5	26,1	39,6	30,2
11/5	28,8	26,3	40,8	30,7
12/5	38,9	24,6	39,2	29,0
13/5	39,1	25,4	39,0	29,5
14/5	38,2	24,2	38,6	28,5
15/5	35,4	25,8	40,5	30,2
16/5	36,0	25,1	40,1	29,6
17/5	35,2	25,0	40,4	29,6
18/5	35,5	25,6	39,8	29,9
19/5	35,5	24,9	39,3	29,2
20/5	38,9	24,9	39,2	29,2
21/5	39,3	24,8	39,8	29,3
22/5	38,7	25,2	40,4	29,8
23/5	33,0	24,9	40,0	29,4
24/5	38,8	25,2	39,3	29,4
25/5	34,2	25,3	40,1	29,7
26/5	38,7	25,2	39,7	29,6
27/5	41,4	25,1	40,5	29,7
28/5	39,4	25,6	39,2	29,7
29/5	38,6	25,2	39,2	29,4
30/5	36,6	25,1	38,4	29,1
31/5	35,5	24,4	39,2	28,8
<b>Média</b>	<b>37,2</b>	<b>25,2</b>	<b>39,8</b>	<b>29,6</b>

Painel De Lavra 02				
Data	Vazão	Temp. úmida	Temp. seca	Temp.IBUTG
1/5	39,4	25,9	39,6	30,0
2/5	38,8	25,6	40,0	29,9
3/5	43,5	25,8	40,1	30,1
4/5	33,6	25,2	38,9	29,3
5/5	37,4	25,8	40,5	30,2
6/5	37,7	24,1	37,9	28,2
7/5	38,3	24,8	39,3	29,2
8/5	36,7	25,2	39,1	29,4
9/5	39,9	25,1	39,4	29,4
10/5	38,1	25,8	39,6	29,9
11/5	42,7	25,4	40,7	30,0
12/5	37,7	25,2	41,7	30,2
13/5	37,1	26,8	39,9	30,7
14/5	41,0	24,6	39,2	29,0
15/5	39,4	24,8	39,8	29,3
16/5	33,8	26,3	38,5	30,0
17/5	39,2	25,7	41,0	30,3
18/5	37,7	24,8	38,3	28,9
19/5	36,9	25,0	40,4	29,6
20/5	35,7	26,1	39,5	30,1
21/5	38,7	25,9	41,0	30,4
22/5	35,5	25,4	39,9	29,8
23/5	38,3	25,7	40,8	30,2
24/5	39,5	25,8	39,0	29,8
25/5	34,2	25,0	39,7	29,4
26/5	34,3	25,0	40,4	29,6
27/5	34,8	25,5	41,3	30,2
28/5	35,3	24,8	39,4	29,2
29/5	31,5	24,9	39,2	29,2
30/5	32,4	25,5	40,8	30,1
31/5	35,5	24,6	39,8	29,2
<b>Média</b>	37,7	25,4	39,8	29,8

Painel De Lavra 01				
Data	Vazão	Temp. úmida	Temp. seca	Temp.IBUTG
1/6	36,7	24,2	40,3	29,0
2/6	37,6	24,4	40,5	29,2
3/6	41,3	24,1	40,6	29,1
4/6	43,5	24,0	40,5	29,0
5/6	36,4	24,7	40,2	29,4
6/6	31,9	25,5	40,6	30,0
7/6	34,0	24,9	39,9	29,4
8/6	35,5	25,2	40,4	29,8
9/6	40,5	24,4	40,1	29,1
10/6	35,5	25,2	39,8	29,6
11/6	38,7	24,4	40,3	29,2
12/6	40,4	24,6	40,1	29,3
13/6	38,1	25,5	40,8	30,1
14/6	38,1	24,4	40,1	29,1
15/6	34,1	25,6	40,8	30,2
16/6	41,4	24,7	39,4	29,1
17/6	41,4	24,4	40,8	29,3
18/6	43,5	24,6	39,8	29,2
19/6	31,1	25,8	40,7	30,3
20/6	38,7	24,3	40,5	29,2
21/6	40,1	24,1	39,5	28,7
22/6	41,9	24,0	29,6	25,7
23/6	34,1	25,3	40,7	29,9
24/6	38,7	25,3	40,6	29,9
25/6	40,1	24,6	40,5	29,4
26/6	33,1	25,9	40,6	30,3
27/6	36,4	25,5	40,2	29,9
28/6	36,9	25,2	39,8	29,6
29/6	33,9	25,8	40,5	30,2
30/6	38,1	24,7	40,1	29,3
<b>Média</b>	<b>38,1</b>	<b>24,7</b>	<b>40,4</b>	<b>29,3</b>

Painel De Lavra 02				
Data	Vazão	Temp. úmida	Temp. seca	Temp.IBUTG
1/6	39,6	25,9	38,8	29,8
2/6	37,5	26,0	39,1	29,9
3/6	29,6	25,1	38,8	29,2
4/6	28,7	25,3	39,7	29,6
5/6	35,6	25,8	38,3	29,6
6/6	32,7	25,5	40,1	29,9
7/6	33,0	26,3	40,3	30,5
8/6	33,8	25,6	38,9	29,6
9/6	31,3	26,1	40,4	30,4
10/6	33,3	25,2	39,1	29,4
11/6	27,7	26,1	40,8	30,5
12/6	37,7	24,7	39,4	29,1
13/6	33,8	25,1	39,6	29,5
14/6	37,7	25,0	40,1	29,5
15/6	34,5	24,2	40,1	29,0
16/6	33,2	26,2	38,6	29,9
17/6	37,1	24,3	39,8	29,0
18/6	35,2	24,5	39,2	28,9
19/6	31,7	24,6	39,3	29,0
20/6	36,3	25,7	39,4	29,8
21/6	32,4	25,0	40,5	29,7
22/6	31,7	24,8	39,4	29,2
23/6	35,8	25,1	40,7	29,8
24/6	34,3	25,2	39,1	29,4
25/6	35,8	24,4	39,2	28,8
26/6	32,3	25,5	39,3	29,6
27/6	32,6	25,1	40,2	29,6
28/6	32,4	24,8	40,5	29,5
29/6	31,2	24,6	39,3	29,0
30/6	33,7	24,7	40,3	29,4
Média	33,5	25,1	39,4	29,5

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, S. Integração das ferramentas da qualidade ao PDCA e ao programa Seis Sigma. 2.ed. São Paulo: Editora Nova Lima, 2006.157p.
- Arthur, J. *Six sigma simplified*. 2.ed. São Paulo: Denver, 2000. 124p.
- Azevedo, I. C. D.; MARQUES, E. A. G. Introdução à mecânica das rochas. 1. ed. Viçosa: Editora UFV, 2006. 357p.
- Barbosa, K. J. Avaliação geotécnica de lavra subterrânea do corpo serrotinho da Mina Cuiabá através de modelagem numérica tridimensional. Ouro Preto: Universidade de Ouro Preto, 2016.201p. (Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia).
- Brasil. Ministério do Trabalho e Emprego (MTE). Secretaria Nacional do Trabalho. NR-15 Atividades e Operações Insalubres. Brasília, 2002.
- Brasil. Ministério do Trabalho e Emprego (MTE). NR 22 – Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração. Brasília, DF: 1999.
- Bonetti, B. Caracterização do ar ambiente de minas subterrâneas de carvão da jazida sul catarinense. Porto Alegre: Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande Do Sul, 2017.87p. (Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia De Materiais).
- Bieniawskiz, T. *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. 1.ed. New York: John Wiley & Sons, 1989. 251p.
- Cardoso, R. R. Verificação do sistema de ventilação de uma mina subterrânea dividido em três estágios de mineração para uma mina de carvão baseado na Mina do Leão II (RS). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, 2014. 20p. (Monografia, Departamento de Engenharia Mecânica).
- Carrasco Galán, J., Alarcón Rojas, D., Albuérne Pérez, J., Fernández Bustillo, E., Fernández Vilas, E., García García, L., Madera García, J. *Manual de ventilación de minas y obras subterráneas*. Aitemin Centro Tecnológico, Madrid, Spain, ISBN 978-84-615-0941-6.2011
- Costa, J.C.A. Estudos para implantação de um modelo de ventilação sob demanda no complexo mineiro de Ipueira. Andorinha: Universidade Federal de Campina Grande, 2017.111p. (Tese, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de processos. 2017).
- Costa, V. L. Análise via simulação da influência da temperatura na produtividade e nos custos de ventilação em mina subterrânea. Ouro Preto: Universidade Federal de

Ouro Preto, 2019. 137p. Dissertação De Mestrado. (Tese, Programa de Pós-Graduação Em Engenharia Mineral).

Carli, C. D. Análise de projeto limite: lavra a céu Vs lavra Subterrânea. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, 2013.123p. (Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais).

Corrêa, G. *Just in time, MRP II e OPT*: um enfoque estratégico. 1.ed. São Paulo: Atlas, 1993.167p.

Coutinho, H. L. Melhoria contínua aplicada para carregamento e transporte na operação de mina a céu aberto. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2017. 94p. (Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral).

Coura, J.F. Panorama da Mineração em Minas Gerais. Instituto Brasileiro De Mineração, Sindicato Nacional da Indústria Da Extração do Ferro de Metais, p.280, 2015.

Curi, A. Lavra de Minas. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.462p.

Curi, A. Minas a céu aberto-Planejamento de lavra. 1.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.223p.

DNPM - Departamento Nacional da produção Mineral. Anuário mineral. Disponível em < [http://www.dnpm-pe.gov.br/Legisla/nrm\\_00.php](http://www.dnpm-pe.gov.br/Legisla/nrm_00.php)>. Acesso em: 22 de abril de 2020.

Falconi, V. Controle da Qualidade Total. 3.ed. Rio de Janeiro: Bloch, 1992.145 p.

Faria, M. P. Fatores intervenientes na segurança do trabalho de abatimento mecanizado de rochas instáveis em uma mina subterrânea de ouro. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2008. 66p. (Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Saúde Pública da Faculdade de Medicina).

Ferreira, Y. A. Análise numérica de perfuração e cimentação de poços de petróleo em evaporitos. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2014. 187p. (Dissertação De Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia).

Gancev, B. F. Avaliação de condições de qualidade do ar em mina subterrânea. São Paulo: Universidade De São Paulo, 2006. 93p. (Monografia, Departamento de Engenharia Mecânica).

Geraldi, J.L.P. *O ABC de Escavações em Rocha*. Rio De Janeiro: Interciência. 2011.284p.

Gonçalves, B.M.G., Portes, D. S.P., Fernandes, D. G. Ventilação em Mina Subterrânea.Disponível em:<<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAu3sAG/ventilacao-minas-subterraneas?part=2#>>. Acesso em: 02 de fevereiro de 2020.

G1. Tragédia em mina de carvão no Sul de Santa Catarina completa 30 anos. Disponível em: <<http://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/2014/09/tragedia-em-mina-de-carvao-no-sul-de-santa-catarina-completa-30-anos.html>>. Acesso em: 09 de outubro de 2020.

Goodman, R. E. *Introduction to rock mechanics*. 2.ed. California: Wiley, 1989.401p

Hall, C.J. *Mine ventilation engineering*. The Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc, 1981. 344p

Hartman, H. L.; Mutmansky, J. M.; Ramani, R. V.; Wang, Y. J. *Mine Ventilation and Air Conditioning*. 2.ed. Alabama: Wiley Interscience, 1991. 791p

Imai, M. *Gemba Kaizen*. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2014. 404p.

Ishikawa, K. *Controle de qualidade total: À Maneira Japonesa*. 1.ed. Rio de Janeiro: Campus, 1993. 222p.

Larson, R. *Estatística Aplicada*. 4.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. 638p.

Lopes, G. F. *Transição da mina a céu aberto para subterrânea no Morro da Mina*. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2012. 131p. (Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral).

Machado, H. G. *Gestão de riscos em minas subterrâneas: avaliação da ventilação em minas profundas*. Ouro Preto: Universidade de Ouro Preto, 2011.172p. (Dissertação de Mestrado, Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica).

Maia, J. *Curso de Lavra de Minas*. 4.ed. Ouro Preto: Gorceix, 1980. 93p.

Massanés, M.B. (2015). *Some approaches to improve the ventilation system in underground potash mines*. Catalonia: University of Catalonia, 2015. 315p. Thesis for the Doctor, Catalonia,

Martins, C. *Avaliação das normas reguladoras de mineração para minas subterrâneas no Brasil e da legislação mineral brasileira para segurança em subsolo*. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2017. 183p. (Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral).

Mcpherson, M. J. *Subsurface ventilation and environmental engineering*.1. ed. New York: Chapman & Hall, 1993. 835p.

Mcpherson, M. J. *Subsurface ventilation engineering. Mine Ventilation Services*. 2009. disponível em: <[www.mvsengineering.com/downloads](http://www.mvsengineering.com/downloads)>. Acesso em 10 de fevereiro de 2020.

- Montgomery, D. C. Introdução ao controle estatístico da qualidade. 4.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004. 513p.
- Ohno, T. O sistema Toyota de produção: além da produção em larga escala. 1.ed. Porto Alegre: Bookman, 1997.147p.
- Passos, J. P. Aspectos diagnósticos dos horizontes litoestratigráficos da mina de potássio Taquari Vassouras, Nordeste do Brasil. São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe, 2012. 93p. (Monografia, Departamento de Geologia).
- Pinto, P. C. Construção de modelos computacionais de redes de fluxo para circuitos de ventilação de minas em subsolo. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, 2004.193p. (Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação Em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais).
- Revista Minérios. Tragédia em mina de carvão no Sul de Santa Catarina completa 30 anos. Disponível em:<<http://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/2014/09/tragedia-em-mina-de-carvao-no-sul-de-santa-catarina-completa-30-anos.html>>. Acesso em: 09 de outubro de 2020.
- Rodrigues, M. Entendendo, aprendendo, desenvolvendo qualidade padrão Seis Sigma. 1.ed. Rio de Janeiro: Quality mark, 2006. 111p.
- Shingo, S. O Sistema Toyota de produção: do ponto de vista da engenharia de produção. 1.ed. Porto Alegre: Bookman, 1996. 291p.
- Torres, V.F.N. *Engenharia ambiental subterrânea e aplicações*. 1.ed. Rio de Janeiro: CETEM/CYTED, 2005.550p.
- Vera, J.N. *Curso de ventilación de Minas para supervisores*. 2.ed. Santiago: Codelco, 1994. 351p.
- Werkema, C. As ferramentas da qualidade no gerenciamento de processos.1. ed. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1995. 108 p.
- Werkema, C. Métodos PDCA e DMAIC e suas ferramentas analíticas.1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012. 208 p.
- Vincenzi, R. A. Análise de ponto ótimo de realocação da alimentação primária para mineração em câmara e pilares. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, 2015. 109p. (Dissertação, Programa de Pós-Graduação Em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais).
- Voitto. Capacitação Lean Seis Sigma Para Green Belt. Juiz de Fora, 2018. (Apostila).
- Voitto. Capacitação Lean Seis Sigma Para Black Belt. Juiz de Fora, 2019. (Apostila).

Vera, J. *Ventilacion de minas*. 1 ed. Santiago: Editora Codelco, 2014. 351p. YANES, E. *Ventilation del mina*. Departamento de Minas, Universidad de Chile, Santiago, 1977.

Vuma. Software for the ventilacion of underground atmospheres - Help function. 2019.

Zingano, A. C. Modelamento geomecânico para o dimensionamento de pilares de carvão. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, 2003.100p. (Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais)