

# REDISTRIBUIÇÃO DA VAZÃO AR EM MINA SUBTERRÂNEA PARA AUMENTO DE HORAS DISPONÍVEIS EM OPERAÇÃO DE LAVRA

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

2 Renan Collantes Candia, UFMG, rcandia@demin.ufmg.br

3 Rita de Cássia Pedrosa Santos, UFCAT, rita.pedrosa@ufg.com

## RESUMO

A mineração vem gerando na economia brasileira uma média de 3,1% no Produto Interno Bruto (PIB) durante o período 2013 a 2018 (IBRAM, 2015) [1], 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. Tendo como premissa que desenvolvimentos contínuos há de serem fomentadas em quaisquer processos, desperdícios necessitam serem minimizados e otimizar faz parte da indústria mineral do século XXI, o estudo teve como princípio a redução do desperdício no processo de ventilação de mina, objetivando a otimização de distribuição de ar, equalização do circuito de ventilação da mina e obtendo como resultado final a redução de horas impactadas em painéis de lavra por motivos de temperatura acima dos limites admissíveis.

**Palavras Chave:** Ventilação de Mina. Gestão de Processos. Melhoria Continua.

## 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 (IBRAM, 2015) [1], however in recessions and increasingly competitive scenarios, it is essential analyze operational bottlenecks to increase the internal value flow chain, as an important factor for the survival and longevity of operations. Taking as a premise that continuous developments must be fostered in any processes, waste needs to be minimized and optimizing is part of the 21st century mineral industry, the study will be the reduction of waste in the mine ventilation process, aiming at the optimization of air distribution, equalization of the ventilation circuit of the mine and obtaining as a final result the reduction of hours impacted in mining panels for reasons of temperature above the permissible limits.

**Key Words:** Mine ventilation. Processes management. Continuous improvement

## 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) [2]. 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) [3], injetando um pensamento enxuto ao redor do mundo nas indústrias manufatureiras e nos setores primários, inclusive o extrativista.

O modelo implementado nas indústrias manufatureiras/automobilísticas do Japão ficou conhecido como STP (Sistema Toyota de Produção) sendo sua filosofia amplamente difundida e até hoje adotada, conhecida como *Lean Manufacturing*, cujo pilar é o foco na identificação e posterior minimização de desperdícios (OHNO, 1991) [4], sendo alguns destes desperdícios conhecidos como: transporte desnecessário, defeitos, processamento inadequado, tempo de espera e movimento desnecessários.

Como processo dentro da mineração subterrânea, a ventilação de mina tem papel direto e correlacionado as questões de segurança, saúde e performance, avaliada este último pelo rendimento do trabalhador ao fator temperatura (Massanés, 2015) [5]. Condições ambientais subterrâneas desfavoráveis causam efeitos no rendimento operacional do colaborador, devendo atender os normas reguladores vigentes e admissíveis inseridas na NR-15 [6] e NR-22) [7].

Segundo Hartmann (1982) [8] 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 produzidos no ambiente subterrâneo, fazendo com que haja a remoção de poeiras e gases a uma velocidade adequada, mantendo a temperatura e umidade dentro das condições exigidas pelas Normas regulamentadoras.

Assim como em todo o processo de mineração, a área da ventilação de mina apresenta problemas, vistos sempre com o olhar de oportunidades de melhorias operacionais. Os desperdícios na ventilação de mina são por vezes imperceptíveis, a menos que aconteçam interrupções nas atividades fins, como por exemplo a elevação da temperatura acima das normas regulamentadoras em frentes de lavra, sondagem, oficinas de manutenção e apoio.

Dentre fatores que contribuem para o aumento de temperatura em uma mina subterrânea, podem ser considerados: fugas de ar geralmente em (cortinas, tapumes, portas, dutos rasgados), 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 aumentando o curto circuito, cruzamento de fluxo de ar (*crossing*), obstrução de insuflação e exaustão. Todos estes fatores podem causar a redução do fluxo de ar (vazão) para os locais de atividade operacional, podendo ser um potencializador para aquecimento e interrupção das atividades.

Segundo Ohno (1991) a equação: Capacidade atual = Trabalho + Desperdício, está associado a variável trabalho em primeiro plano aos trabalhadores, sendo possível produzir

mais com a mesma ou com menor força de trabalho, desta forma o trabalho foi embasado na análise de desperdícios associadas à ventilação de mina, para estabilização do processo de ventilação de mina, gerando menores perdas produtivas por aumento de temperatura em painéis de operação de lavra.

## 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 cultura na empresa. Por outro lado, projetos inadequados implicarão na 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 na 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.

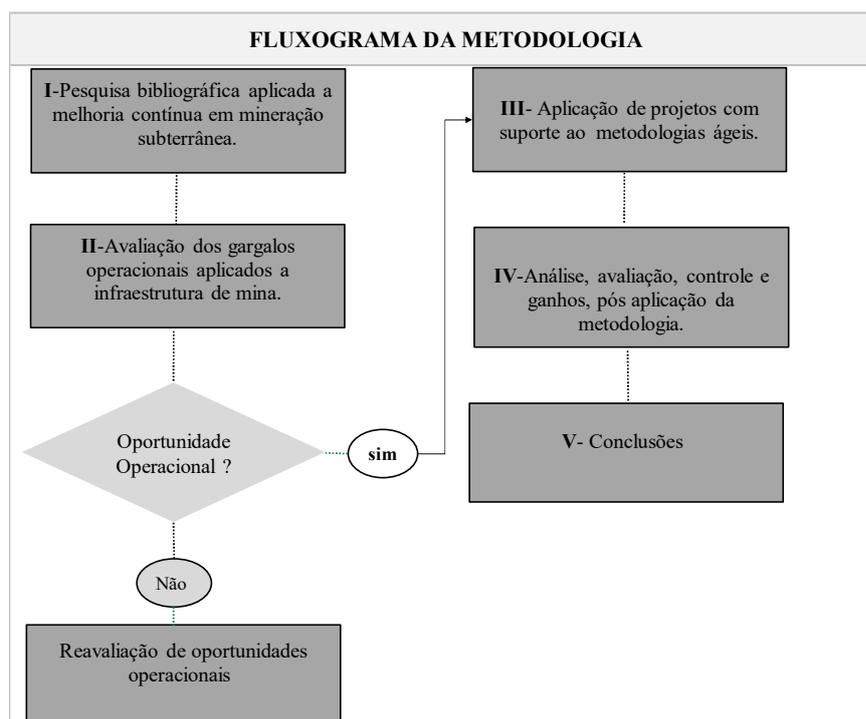


Figura 1- Fluxograma para metodologia Lean em ventilação de mina (contribuição do autor, 2020).

Para o setor da infraestrutura da mina relacionados à ventilação, foram realizadas coletas de vazão de ar e temperatura em locais estratégicos na região de entroncamento das rampas principais do circuito de ventilação, no período 28/01/20 à 02/03/20 para instalação das portas e reguladores, além da compilação dos dados de vazão e temperatura já existentes em 2019. Após as coletas serão analisados os dados com análise quantitativa/estatística, a

fim de buscar parâmetros que possam ajudar a tomada de decisões para a melhoria do processo da redistribuição de vazão de ar para atendimento a temperatura admissível.

## 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 brake*, transporte por correia transportadora e içamento de material por sistema de poço.

Em 2019 o ROM foi 12 % menor, e para buscar ganhos nos processos produtivos, ocorreu a necessidade da identificação de falhas e implementação de medidas para torná-los mais efetivos, sendo a melhor forma utilizada para análise, a adoção de *KPI's*. O termo *KPI* vem do inglês *key performance indicator* (indicador chave de desempenho). Estes *KPI's* indicam o desempenho das atividades e processos, permitindo o acompanhamento sistemático de metas estabelecidas.

A maior vantagem do uso destes indicadores é a transformação 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 sejam necessários. Em outras palavras, os *KPI's* oferecem um diagnóstico preciso da organização, o que torna os erros no planejamento cada vez menos frequentes.

Estratificando os principais indicadores de performance de desempenho em 2019, a utilização representada pela equação 1, foi a que mais teve maior impacto no processo de operação da mina em cerca de 79 %, visualizada pela Figura 2.

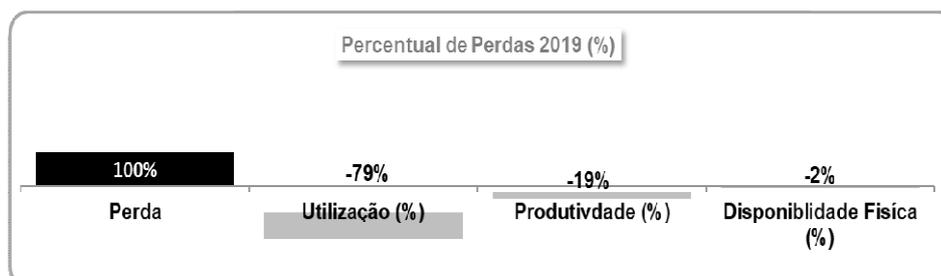


Figura 2- Perdas acumuladas em percentual de R.O.M.

$$Utilização (\%) = (H.T)/(H.P - H.O) \quad (1)$$

Sendo:

H.T= Total de horas efetivamente trabalhadas.

HP= Corresponde às horas calculadas por ano, na base de turnos previstos, já definido em conta a disponibilidade física dos equipamentos.

HO= Corresponde às horas de reparos de manutenção, incluindo a falta de peças no

estoque ou falta de equipamentos auxiliares.

Sendo a utilização (%) o indicador responsável pelas maiores perdas na operação de lavra, é necessário o entendimento das causas que a impactaram, subdivididas em horas paradas planejadas (orçadas para o ano base 2019) e não planejadas (não orçadas para o ano base 2019), conforme Tabela 1.

Tabela 1- Paradas planejadas e não planejadas relacionadas ao fator da utilização.

Área	Causas	Horas Paradas (h)		
		Não Planejadas	Planejadas	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>

As horas paradas não planejadas representam cerca de 66,8 % (4.536 h) do total de horas paradas totais relacionados à operação de lavra, sendo as de maior representatividade: emanção de gás (847 h), aumento de temperatura do painel (639 h) e falta de operador (476 h). Tendo como premissa a assertividade da escolha do projeto, será priorizado como estudo a avaliação do aumento de temperatura no painel de lavra, pela disposição de dados. Este problema associado à ventilação de mina representou uma perda de 5.071 t de KCL (produto de venda), com perdas estimadas em R\$ 5.120.000,00 conforme Figura 3.

MEMÓRIA DE CÁLCULO DE PERDA			
<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. KCI</b>	%	82%
<b>Resultados Financeiros 2019:</b>			
	Item	Unidade	2.019
Perda	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>

Figura 3- Estimativas de perdas financeiras.

Para a ventilação de mina o principal indicador de paradas de atividades é relacionado à temperatura IBUTG (°C), sendo estabelecido que temperaturas com valores maiores ou iguais a 31,1 °C determinam a paralisação das atividades, até redução abaixo do limite conforme NR 15. Das horas totais paradas não planejadas, especificamente dois painéis denominados um (1) e dois (2) representaram 80 % (503 horas) do impacto, conforme Figura 4.

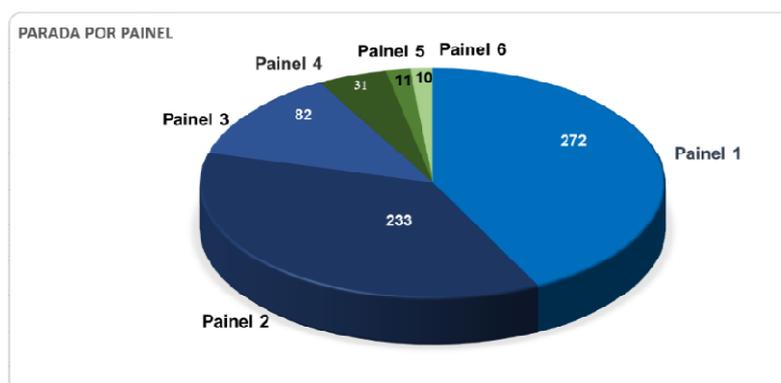


Figura 4- Tempo de parada de painel de lavra em horas, por aumento de temperatura em 2019

Utilizando o quantitativo do número de horas dos principais painéis com maiores perdas (h), foram analisados 481 dados coletados em 2019 de temperatura (IBUTG-°C) e vazão (m³/s), conforme Tabela 2 e 3.

Tabela 2- Temperatura média (°C) e vazão (m³/s) no painel 1.

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

Tabela 3- Temperatura média (°C) e vazão (m³/s) no painel 2.

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

A análise estatística das 481 medições de temperatura e vazão médias nestas frentes de lavra, puderam ser interpretadas com uso do software Minitab 18.0, e visto pelas Figuras 5 e 6.

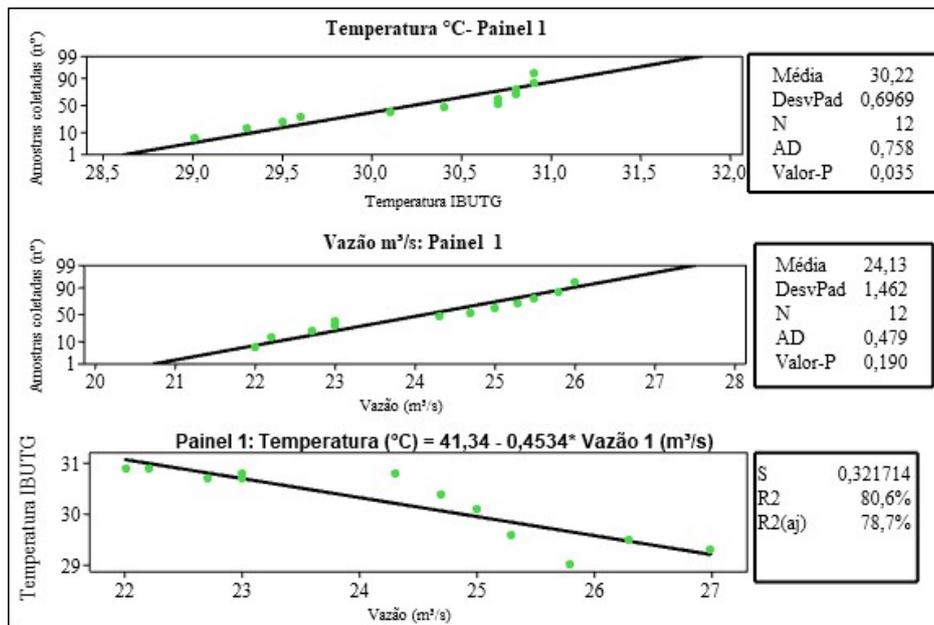


Figura 5– Análise estatística de correlação de vazão e temperatura para o painel 1.

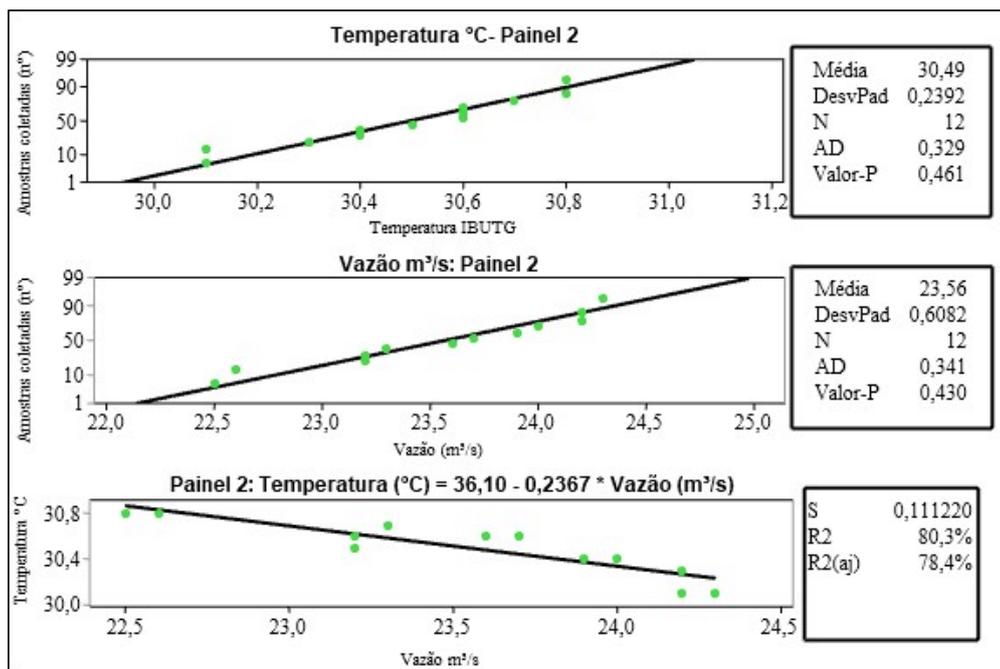


Figura 6– Análise estatística de correlação de vazão e temperatura para o painel 2.

a) Painel 1: Média de entrada de vazão de ar de 24,1 m³/s, temperatura média 30,2 °C.  $R^2 \geq 80,6\%$ . Os dados de temperatura e vazão não são normais pois  $P > 0,005$ .  $R^2$  obedece a relação de ( $R^2 > 50,1\%$ ), podendo ser considerado a temperatura (m³/s) com correlação direta com a vazão (m³/s). Podemos considerar a equação linear 1, como a temperatura em função da vazão de ar que chega ao painel. A equação 1 foi encontrada com uso da correlação (temperatura e vazão) utilizando o Minitab 18.0. Obs: O valor de N (=12) na Figura 5 está representada a quantidade de meses ao longo do ano, contemplando 481 amostras coletadas.

$$Temperatura\ ^\circ C = 41,34 - 0,4534 \times Vaz\tilde{a}o\ medida \quad (2)$$

b) Painel 2: Média de entrada de vazão de ar de 23,6 m<sup>3</sup>/s, temperatura média 30,5 °C. R<sup>2</sup>> 80,3 %. Os dados de temperatura e vazão não são normais pois P > 0,005. R<sup>2</sup> obedece a relação de (R<sup>2</sup>> 50,1 %), na qual pode ser considerado a vazão (m<sup>3</sup>/s) com correlação direta com temperatura. Podemos considerar a equação linear 1, como função da temperatura em função da vazão. Obs: O valor de N (=12) na Figura 6 está representada a quantidade de meses ao longo do ano, contemplando 481 amostras coletadas.

$$Temperatura\ ^\circ C = 36,28 - 0,2367 \times Vaz\tilde{a}o\ medida \quad (3)$$

A temperatura sendo fator correlacionável com a vazão de ar (R<sup>2</sup>>50,1 % para ambos painéis), mostram evidências estatísticas que o aumento da vazão de ar poderá ter efeito na redução da temperatura nos painéis de lavra. A Tabela 4 é demonstrado os setores/regiões da mina com vazão de ar além da necessidade teórica (área norte e sul), enquanto outros locais com deficiência teórica de vazão (área nordeste). Essa análise corrobora para verificação de perdas relacionadas ao circuito de ventilação nos painéis 1 e 2.

Tabela 4- Vazão simulada x vazão necessária por área

**Vazão: (Sem Regulador e Portas)**

<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>		284	189	+95

Com as coletas de vazão de ar (m<sup>3</sup>/s) nos painéis 1 e 2 (área NE), verifica-se que a quantidade de ar que chega nestes locais é de 41 m<sup>3</sup>/s, sendo o necessário 50 m<sup>3</sup>/s (deficiência de 9 m<sup>3</sup>/s no total), constatando a necessidade de maior vazão ar para estes locais. Para os painéis 3 e 4 (área N) há uma oferta de 133 m<sup>3</sup>/s e necessidade de 56 m<sup>3</sup>/s (+77 m<sup>3</sup>/s), já para o painel 5 e 6 (área S) oferece uma condição de oferta de 110 m<sup>3</sup>/s, com necessidade operacional de 83 m<sup>3</sup>/s (+ 27m<sup>3</sup>/s). Todas as quantidades de vazões de ar

necessárias, foram consideradas para o atendimento das temperaturas admissíveis em ambiente subterrâneo, considerado como trabalho moderado pela NR 15.

A simulação com utilização do software VUMA, terá como premissa o estudo do redirecionamento forçado/induzido de parte do fluxo de ar saindo do ventilador central para a área NE que contempla os painéis 1 e 2, fazendo com que uma maior oferta de vazão de ar contribua para a redução da temperatura nestes locais.

## DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A análise visa realizar a redistribuição de vazão de ar na, e manter a temperatura dentro dos limites estabelecidos pelas normas regulamentadoras, fazendo com que se reduzam as paradas de painéis de lavra por temperatura acima das admissíveis.

Com uso do software de simulação Vuma [9] foi realizada uma validação em três cruzamentos na distribuição do fluxo das áreas: norte, nordeste e sul. Esses trechos foram usados para determinar alguns dos parâmetros fundamentais da mina relacionados ao direcionamento do fluxo de ar, sempre com efeito dos parâmetros dos ventiladores principais conforme Figura esquemática 7.

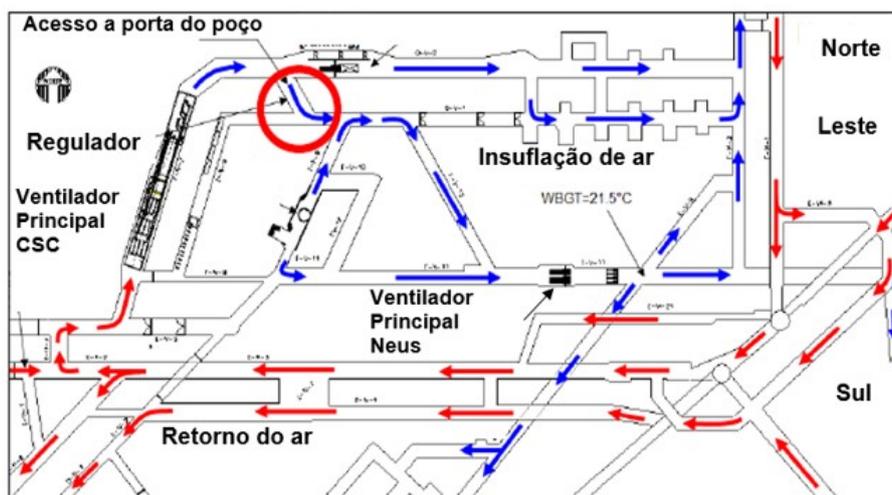


Figura 7- Exemplo de calibração para simulação de redistribuição de ar, com uso de software.

Além da verificação dos ventiladores a modelagem necessita de alguns parâmetros e características para a realização da simulação com utilização do software VUMA, para a qual foi preciso assumir algumas simplificações, e os valores adotados descritos na Tabela 4.

Tabela 5- Dados para calibração do modelo do circuito de ventilação.

Principais informações para simulação do VUMA			
Descrição	Unid	Valores adotados	Informações Software
Área	m <sup>2</sup>	9,0	<p>Hints</p> <p>Portas RN2  Tunnel reduced area : (Rect 3.0 m X 3.0 m); Op  Layer I: N/A  Layer II: N/A  Level: Underground  Mass flow: 48.0 kg/s  Volume flow: 38.1 m<sup>3</sup>/s  Pressure drop: 1442.4 Pa  Resistance: 0.9951 Pa/(m<sup>3</sup>/s)<sup>2</sup>  Velocity: 4.2 m/s  Air heat: 0 kW  Branch outlet: 15.3 °C (wb)  Branch outlet: 21.0 °C (db)  ACP: 257.5 W/m<sup>2</sup>  WGBT: 17.0 °C  Tzk: 0.0 °C</p> <p>Settings</p>
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	

Para simplificação do estudo foram adotadas algumas considerações:

- ✓ Na análise analítica não foram consideradas as perdas de carga para os reguladores, por meio da resistência equivalente;
- ✓ Os painéis de lavra conservam as mesmas características e concepções do planejamento de mina de 2019;
- ✓ Não ocorreram mudanças nos equipamentos de lavra e de apoio da mina;
- ✓ A produção planejada em 2019, continua em linha com a produção planejada de 2020;
- ✓ Não foram consideradas variações da temperatura na superfície, assumindo o valor de 27,2 °C;
- ✓ Foram desconsideradas obstruções de máquinas e equipamentos
- ✓ 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 representado pela Figura 8, mostra que a vazão inicial de ar (início da rampa de acesso principal) para a área nordeste está em torno de 89 m<sup>3</sup>/s.



Figura 8- Vazão de ar atual para os painéis de lavra 1 e 2.

As coletas de vazão em campo permitem verificar que a quantidade de ar disponibilizado para os dois painéis de lavra com maiores interrupções por temperatura (1 e 2), está em torno de 41 m<sup>3</sup>/s, com necessidade mínima de 50 m<sup>3</sup>/s, esquematizada pela Figura 9.



Figura 9- Vazão mínima para a área nordeste dos painéis 1 e 2.

A Figura 10 evidencia desperdícios de recursos da mina, já que todos os painéis estão com perdas de ar acima da referência (*benchmark*) mínima adotada de 25 %.

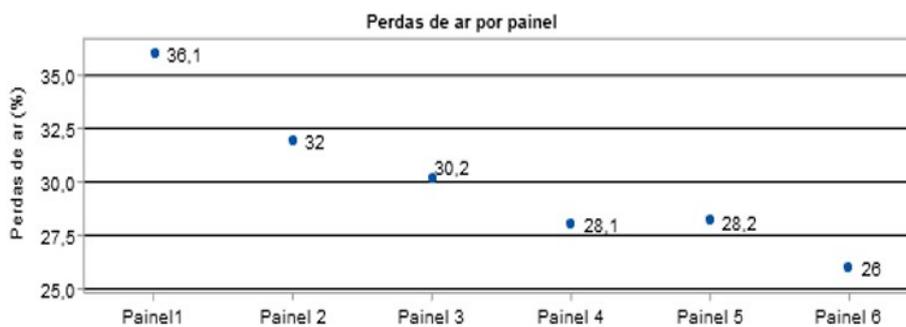


Figura 10- Simulação de vazão de ar atual para os painéis de lavra 1 e 2.

Com a utilização do software VUMA, foi estudada e avaliada a instalação de um regulador e portas, para redistribuição do fluxo de ar na região de entroncamento das três áreas da mina (norte, nordeste e sul). As Figuras 11 e 12, mostram que o fluxo de ar pode ser redistribuído na mina com uso de reguladores e portas.

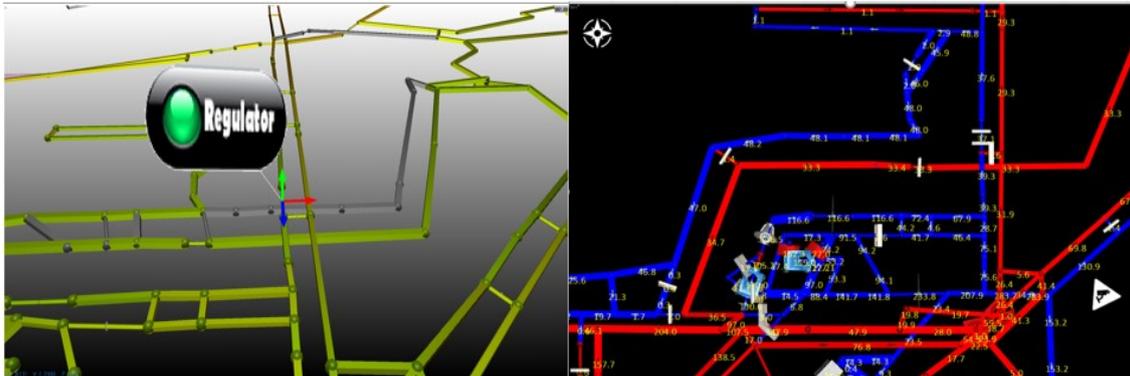


Figura 11- Simulação de vazão de ar atual para os painéis de lavra 1 e 2 com uso de reguladores/portas.

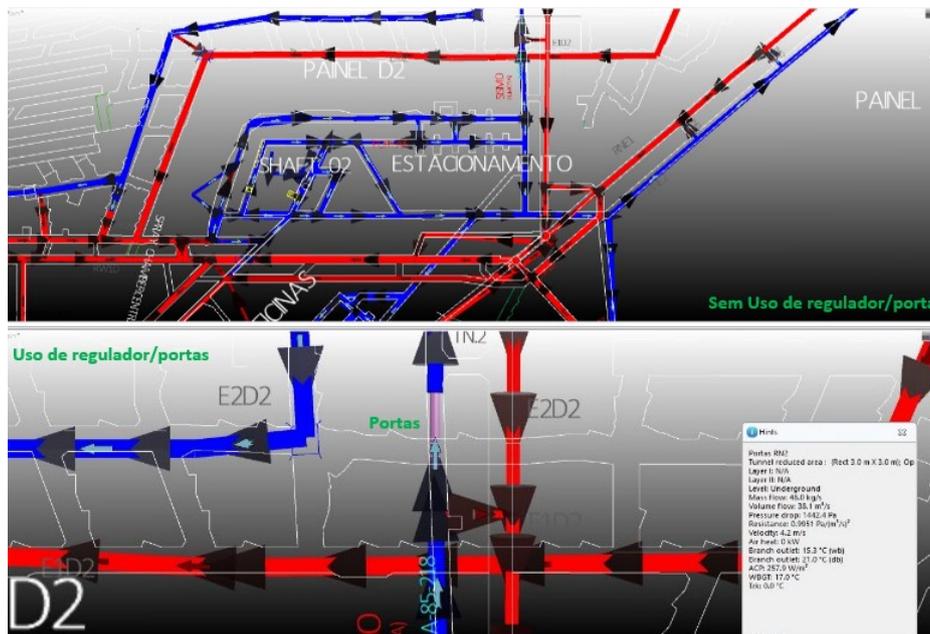


Figura 12- Simulação do circuito de ventilação, com uso de reguladores/portas.

A Tabela 5 confirma que a instalação do direcionador da vazão de ar, juntamente com as portas, garantem uma equalização do circuito de ventilação nas áreas norte, nordeste e sul, adotando como ponto importante a redução da ineficiência do processo no circuito de ventilação adotando as premissas colocadas na simulação.

Tabela 5- Simulação de vazão com uso de reguladores.

### Vazão: (Com Regulador e Portas)

Painel	Área	Vazão Medida (Kg/m <sup>3</sup> )	Vazão Necessária (Kg/m <sup>3</sup> )	Diferença (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>

A área nordeste (NE) terá uma vazão conjunta inicial de 78 m<sup>3</sup>/s com instalação de reguladores/portas, e anteriormente 50 m<sup>3</sup>/s sem o estudo de redistribuição de ar, esquematizado pela Figura 13.

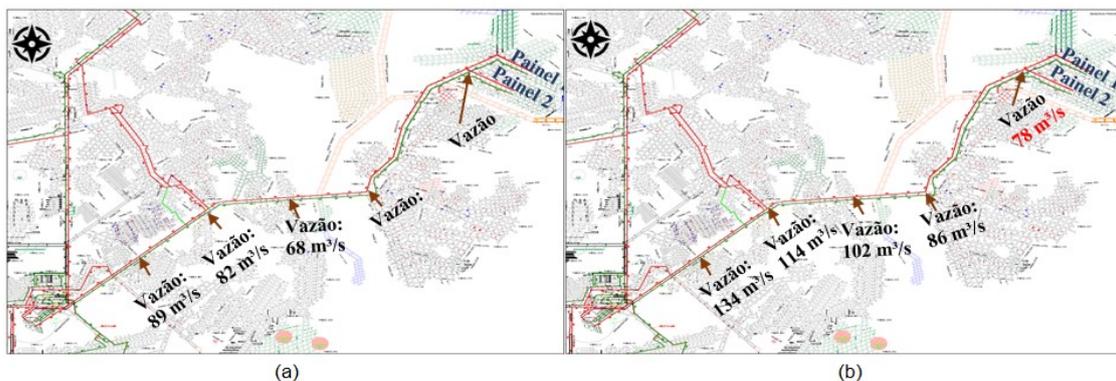


Figura 13- (a) vazão atual (m<sup>3</sup>/s) para os painéis 1 e 2, (b) vazão simulada para os painéis 1 e 2 (Contribuição do autor, 2020).

O uso da simulação foi mostra que:

- Área nordeste (NE): atualmente sem regulador de ar, os painéis (1 e 2) vazão de ar insuficiente para operação de lavra sem interrupções pelo efeito de aumento de temperatura acima da admissível.
- Área norte (N) e (S): sem problemas atrelados a vazão mínima requerida antes da simulação, atenderiam aos parâmetros admissíveis pela NR após a simulação (figura 14)



Figura 14- (a) local sem direcionador de fluxo de ar, (b) instalação de porta e reguladores.

A instalação das portas e reguladores foi realizada durante o período de 25/03/20 à 27/03/20, sendo coletadas diariamente as vazões e temperaturas a partir de 01/04/20 à 30/06/20, conforme Figuras 15 e 16.

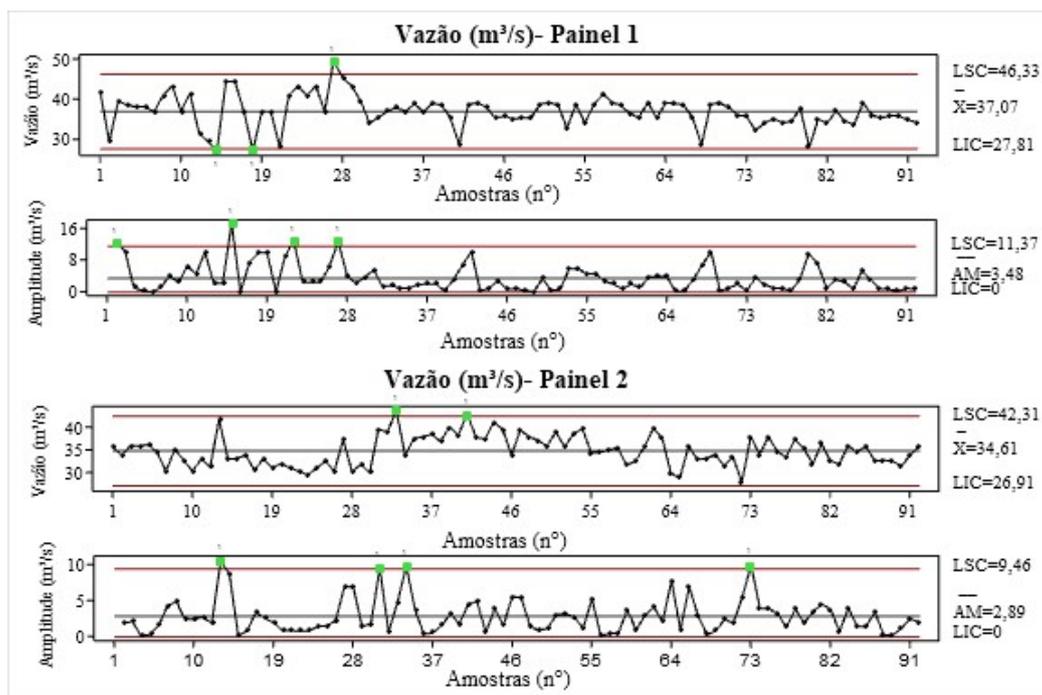


Figura 15- Carta de controle para vazão de ar referente aos painéis 1 e 2, após a instalação de portas e reguladores.

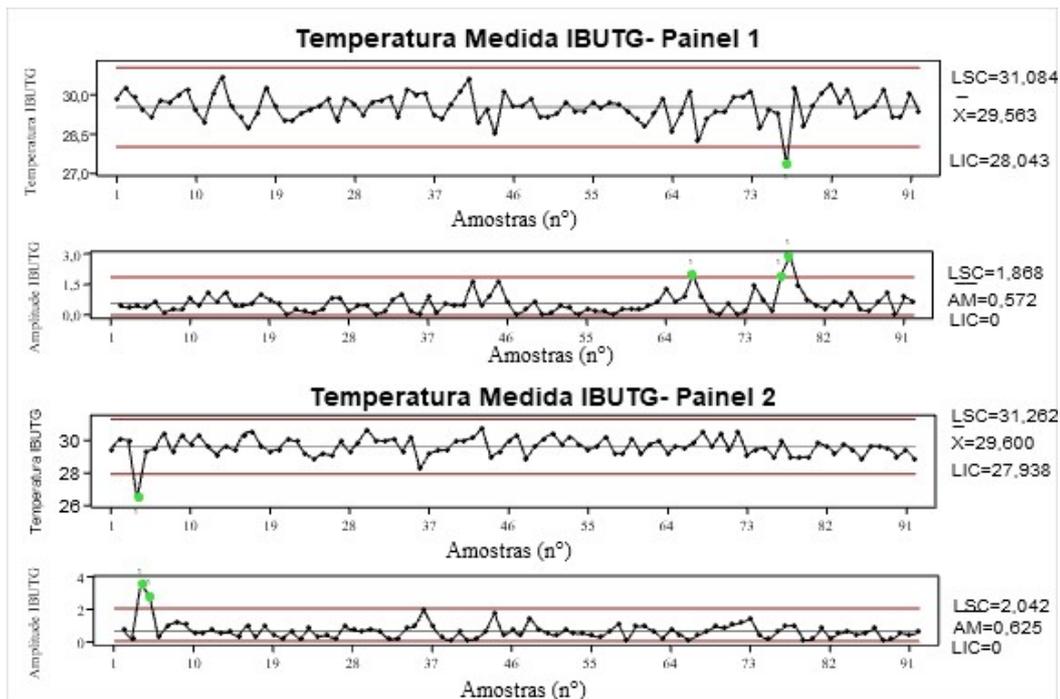


Figura 16- Carta de controle para temperatura referente aos painéis 1 e 2, após a instalação de portas e reguladores.

Em que:

- ✓ LSC (Limite superior central): trata-se do maior valor encontrado/medido/coletado dentre as 91 amostras. Neste caso a maior vazão de ar do painel 1 e 2 foram respectivamente 46,33 m<sup>3</sup>/s e 42,31 m<sup>3</sup>/s, e para a temperatura IBUTG foi de 31,1 °C para o painel 1, e 31,3 °C para o painel 2.
- ✓ LIC (Limite inferior de controle): trata-se do menor valor encontrado/medido/coletado dentre as 91 amostras. Neste caso a menor vazão de ar do painel 1 e 2 foram respectivamente 27,81 m<sup>3</sup>/s e 26,91 m<sup>3</sup>/s, e para a temperatura IBUTG foi de 28,0 °C para o painel 1, e 27,9 °C para o painel 2.
- ✓ AM (Amplitude): diferença entre o maior valor encontrado da amostra e o menor.
- ✓  $\bar{x}$  (Média): valor médio das amostras coletadas.

Com a instalação do regulador para distribuição e equalização do circuito, foram comparadas as vazões e temperatura dos painéis 1 e 2 referentes à média de 2019 sem uso de portas e reguladores, e a média 2020 com uso de portas e reguladores (após sua instalação), e valores simulados com uso do software Vuma, demonstradas pela Figura 17 e 18.

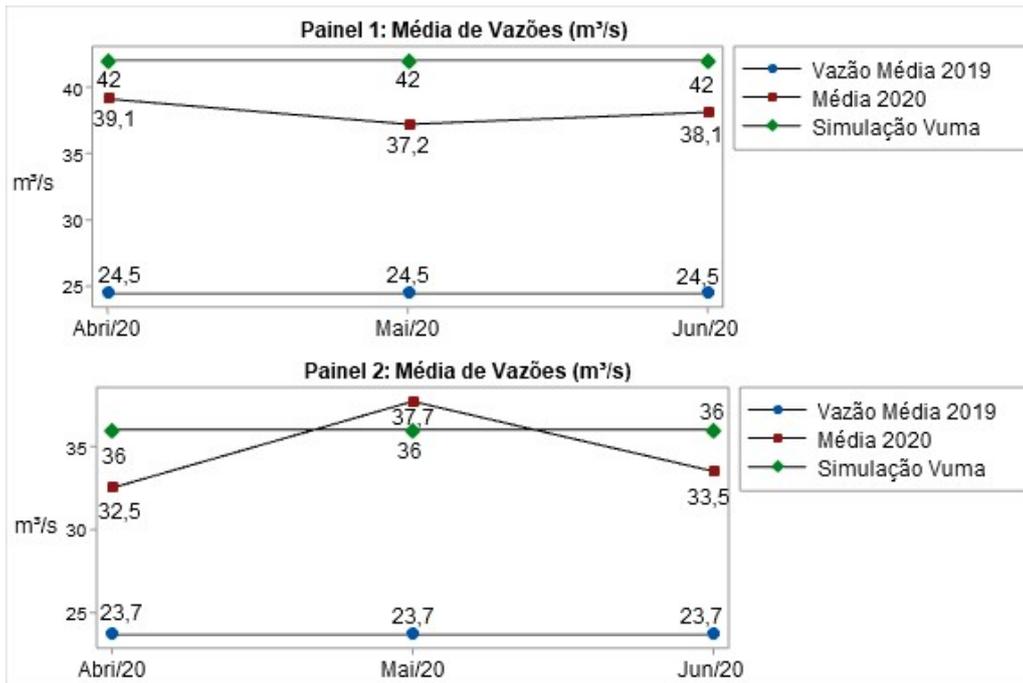


Figura 17- Comparativo da vazão média de 2019, 2020 e simulada, referente aos painéis 1 e 2, após a instalação de portas e reguladores.

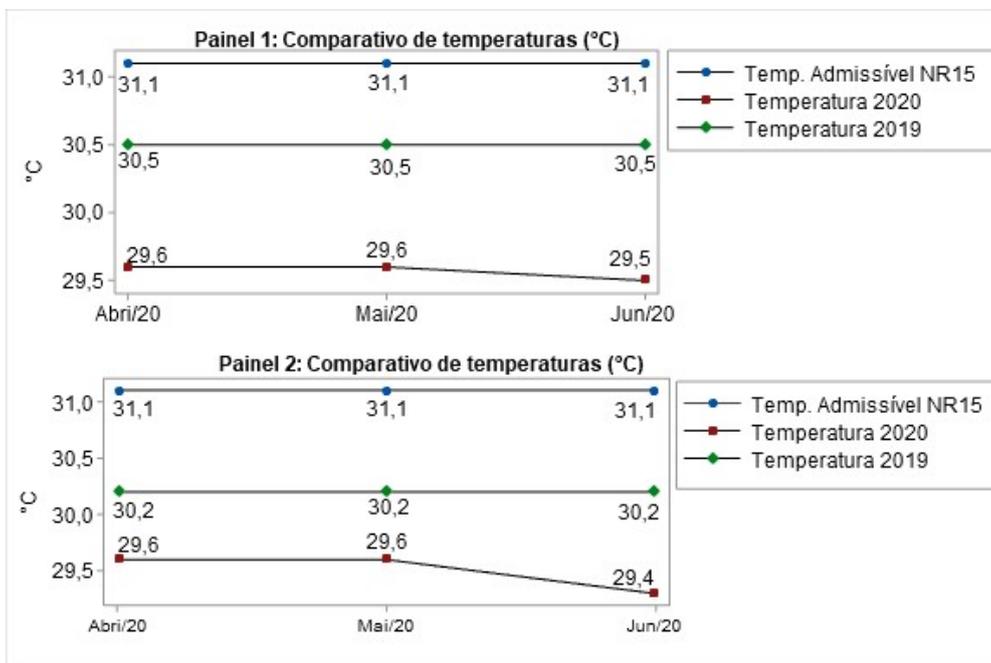


Figura 18- Comparativo de temperatura média de 2019, 2020 e simulada, referente aos painéis 1 e 2, após a instalação de portas e reguladores.

Com a instalação do regulador e portas, foi comparado as paradas das frentes de lavra no período de abril a junho de 2019 e 2020. É demonstrado o efeito positivo na instalação de reguladores e portas, obtendo redução de -78% no tempo total de paradas por temperatura,

conforme Figura 19.



Figura 19- Comparativo do número de horas paradas de painéis de lavra, por temperatura durante o trimestre de 2019 e 2020.

Comparando--se o trimestre de abril á junho de 2019 e 2020 ocorreu uma redução de -145 h em horas paradas por aumento de temperatura, gerando um retorno financeiro estimado de R\$ 1.164.000,00, pelo maior número de horas disponíveis a operação de lavra.

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 20- Cálculo financeiro de retorno com redução do número de horas paradas por temperatura em painéis de lavra.

## CONCLUSÃO

O indicador de performance utilização em 2019 representou o maior percentual de perdas do ROM em 79%. A análise de perdas por paradas não planejadas mostra que a ventilação de mina representou impacto 639 horas/ano na disponibilidade de horas/utilização para a operação de lavra. Estas horas resultaram em perdas produtivas de 22.596 t de ROM, equivalendo a R\$ 5.120.000,00 de produto comercializado. Ações em curto espaço de tempo e alto impacto eram necessárias para redução de paradas na operação de lavra,

minimizando desperdícios/horas de paradas a serem disponíveis.

A análise realizada da oferta e demanda da vazão de ar para os painéis de lavra, atestou que a mina não se atentou para o desperdício de recursos, representado neste caso pela vazão de ar. Observa-se que a vazão atual disponível de 284 m<sup>3</sup>/s (já eliminada as perdas) é suficiente para atendimento aos painéis de lavra, sendo necessidade estimada de 189 m<sup>3</sup>/s.

A análise de dados relacionados ao circuito de ventilação em 2019, demonstra que o valor da vazão mínima para não ocorrer paradas por temperaturas nos painéis 1 e 2 é de 50 m<sup>3</sup>/s, e valores medidos em campo indicam uma vazão conjunta que chega a estes painéis de 41 m<sup>3</sup>/s, tornando insuficiente a vazão de ar para estes locais, tendo como consequência parada das operações para ações corretivas de estabilização de temperatura. As perdas atuais do circuito por fugas/perdas de ar estão acima de 30 %.

A simulação com uso do software Vuma, demonstrou uma possibilidade de redistribuição 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, foi de 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, é verificado também que a redistribuição de vazão de ar da mina é suficiente para atendimento aos seis painéis de lavra no que se refere a vazão mínima necessária para a operação de lavra.

Foi evidenciado um efeito positivo com a instalação dos reguladores na mina, para 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.

A temperatura dentro dos limites admissíveis durante o período de abril à jun/20, representa -78 % em horas paradas por ventilação confrontando os anos de 2019 à 2020 durante os meses de abril à maio, gerando incremento de 4.485 t de ROM, e receita estimada em R\$ 1.164.000,00, atrelada as horas disponíveis e sendo utilizadas para operação de lavra.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. 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.
2. Curi, A. (2017).Lavra de Minas. Oficina de Textos, v.1, p.19-28.
3. Werkema, C. (1995). As ferramentas da qualidade no gerenciamento de processos. Fundação Christiano Ottoni, v.1, p. 22-64.
4. Ohno, T. O Sistema Toyota de produção: além da produção em larga escala. Bookman, v.1, p. 23-39.
5. Massanés, M.B. (2015). Some approaches to improve the ventilation system in

underground potash mines. Thesis for the Doctor, University of Catalonia, Catalonia, Spain, p.315.

6. Ministério do Trabalho e Emprego. (1978). NR15- Atividades e Operações Insalubres. Ministério do Trabalho e Emprego. Acesso disponível <<http://www.mte.gov.br/temas/segsau/legislacao/normas/conteudo/nr15>>. Data de acesso: 10/02/2020.
7. Ministério do Trabalho e Emprego. (1999). 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>>. Data de acesso: 23/02/2020.
8. Hartman, H.L. (1982). Mine ventilation and air conditioning. Wiley Interscience, v.2, p.3-67.
9. VUMA. Software for the ventilacion of underground atmospheres - Help function. 2019.