



Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Escola de Minas
Departamento de Engenharia de Minas
Campus Morro do Cruzeiro
Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil



MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE MINAS

ESTUDO DA ECONOMIA ENERGÉTICA COM A
IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO SOB
DEMANDA NA MINA VAZANTE

Felipe Casagrande Pereira

Ouro Preto, 05 de dezembro de 2018

Felipe Casagrande Pereira

**ESTUDO DA ECONOMIA ENERGÉTICA COM A IMPLEMENTAÇÃO DO
SISTEMA DE VENTILAÇÃO SOB DEMANDA NA MINA VAZANTE**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia
de Minas da Escola de Minas da Universidade
Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos
para a obtenção do Grau de Engenheiro de Minas

Orientador: Prof. Dr. José Margarida da Silva

Ouro Preto, 05 dezembro de 2018



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

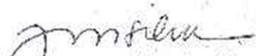
Aos 05 dias do mês de dezembro de 2018, às 08h30min, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DEMIN/EM, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado "ESTUDO DE ECONOMIA ENERGÉTICA COM A IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO SOB DEMANDA NA MINA DE VAZANTE", pelo aluno Felipe Casagrande Pereira, sendo a comissão avaliadora formada por Prof. Dr. José Margarida da Silva (orientador), Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz e Prof. Dr. Elton Destro.

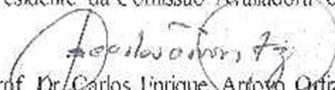
Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela APROVAÇÃO do candidato, com a nota 9,0 concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

O aluno fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após a entrega dos exemplares definitivos (Cd e cópia impressa) da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

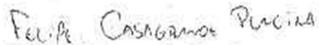
Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pelo discente.

Ouro Preto, 05 de dezembro de 2018.


Prof. Dr. José Margarida da Silva
Presidente da Comissão Avaliadora e Professor Orientador


Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz
Membro da Comissão Avaliadora


Prof. Dr. Elton Destro
Membro da Comissão Avaliadora


Felipe Casagrande Pereira


Prof. M.Sc. José Fernando Miranda
Professor responsável pela Disciplina Min 491 – Trabalho de Conclusão de Curso

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e aos meus irmãos pelo amor incondicional e por serem minha base.

Agradeço aos meus familiares e amigos pelo apoio e confiança.

Agradeço aos Professores pelos ensinamentos.

Agradeço à Universidade Federal de Ouro Preto pela oportunidade.

Agradeço a Camila por toda a ajuda na construção desse trabalho.

Agradeço ao Pedro Lincoln por sua colaboração indispensável.

Agradeço ao Ciências sem Fronteiras e a Minera Jr. por todas as experiências e aprendizados

Finalmente, agradeço a empresa Nexa Resources da mina Vazante por permitir a criação desse trabalho e a equipe do Serviços Técnicos por me ajudarem a chegar até aqui.

RESUMO

A vertente sustentável que ocorre no mercado da mineração, juntamente com a maior complexidade dos corpos minerais, exigem soluções com maior aplicação de engenharia. O grande desenvolvimento tecnológico vem sendo indispensável no enfrentamento desses desafios. Nesse contexto, a Ventilação Sob Demanda surgiu como uma solução para a otimização do gasto energético e melhor aproveitamento do sistema de ventilação como um todo. Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo descrever o funcionamento de um sistema de ventilação em uma mina subterrânea, as normas que regem o mesmo, além de mostrar a aplicabilidade do VOD (*Ventilation on Demand*), apresentando um estudo de caso para a Mina Vazante. O estudo levou em consideração a mudança da rotação dos ventiladores principais, por meio da instalação de inversores de frequência, durante as trocas de turno quando o quadro de pessoal e equipamento é consideravelmente reduzido em subsolo. Com o intuito de mensurar a economia energética obtida pelo sistema de VOD, foram retirados todos os dados de potência consumida no mês de julho de 2018 dos ventiladores dos setores Sucuri I e II, e do Lumiadeira I da Mina Vazante. Foram coletados e tratados mais de 100 mil dados, para cada ventilador, a fim de estabelecer o consumo de energia em cada hora do dia e compará-lo com o a potência requerida para o sistema funcionar com sua capacidade total. A economia encontrada no período analisado na Mina Vazante foi de 15,29% nas condições dimensionadas, algumas melhorias podem ser executadas de acordo com as oportunidades encontradas conforme a evolução do sistema. Uma enorme variedade de sistemas vem sendo criados possibilitando a ampliação dos ganhos obtidos.

Palavras-chave: Ventilação, Automação, Ventilação Sob Demanda, Economia energética, Lavra subterrânea.

ABSTRACT

The sustainable trend that occurs in the mining market, together with the greater complexity of the mineral bodies, demands solutions with greater application of engineering. The huge technological development has been indispensable in facing these challenges. In this context, Ventilation on Demand emerged as a solution for the optimization of energy expenditure and better utilization of the ventilation system as a whole. Thus, the present work had as objective to describe the operation of a ventilation system in an underground mine, the government legislation in this subject, besides showing the applicability of VOD (Ventilation on Demand), presenting a case study for the Mine Vazante. The study took into account the change of rotation of the main fans, by the installation of a variable frequency drives, during shift exchanges when the staff and equipment is considerably reduced underground. In order to measure the energy savings obtained by the VOD system, all data of power consumed in the month of July 2018 of the fans of the Sucuri I and II, and of the Luminaire I of the Vazante Mine were withdrawn. More than 100 thousand data were collected and processed for each fan in order to establish the energy consumption in each hour of the day and to compare it with the power required for the system to rotate with its total capacity. The economy found in the period analyzed in the Mina Vazante was 15.29% in the dimensioned conditions, some improvements can be executed according to the opportunities found according to the maturity of the system. A wide variety of systems have been created, allowing the gains to be increased

Key words: Ventilation, Automation, Ventilation on Demand, Energy savings, Underground Mining.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Elementos principais de um circuito de Ventilação (Modificado: MCPHERSON, 1993).....	5
Figura 2: Modelo Computacional da Mina Vazante região do Lumiadeira com o Ventsim Visual®.....	12
Figura 3: Representação esquemática dos dois tipos de ventiladores, centrífugo (esq.) e axial (dir.) (VUTUKURI e LAMA, 1986 Apud COSTA, 2017).	13
Figura 4: Regulador de vazão para galerias de ventilação (Fonte: Kashnikov, sd).....	18
Figura 5: Localização do município de Vazante (Fonte: Wikipédia, 2018).....	21
Figura 6: Perfil Geológico (Fonte: CHARBEL, 2015).	22
Figura 7: Perfil Longitudinal da Mina Vazante e Extremo Norte.	23
Figura 8: Ciclo operacional desenvolvimento (PAIVA, 2018).	24
Figura 9: Blocos de lavra VRM na Mina Vazante (Fonte: Nexa Resources).....	25
Figura 10: Fluxograma simplificado da Mina Vazante.	26
Figura 11: Poço de ventilação Sucuri II.	27
Figura 12: Instalação Lumiadeira II	27
Figura 13: Tela de status dos ventiladores.	31
Figura 14: Gráfico de variáveis do ventilador na plataforma PIMS.....	32
Figura 15: Tela de configuração dos horários de redução de velocidade dos ventiladores.	33
Figura 16: Planilha de Schedule e estimativa das potências.	35
Figura 17: Gráfico da média de consumo energético em kWh ao longo das 24 horas do dia dos ventiladores do Lumiadeira I durante o mês julho de 2018.....	36
Figura 18: Gráfico da média de consumo energético em kWh ao longo das 24 horas do dia dos ventiladores do Sucuri I durante o mês julho de 2018.....	37
Figura 19: Gráfico da média de consumo energético em kWh ao longo das 24 horas do dia dos ventiladores do Sucuri II durante o mês julho de 2018.....	37
Figura 20: Gráfico comparativo de potência com e sem inversores de frequência.	38
Figura 21: Redução do consumo com a VOD dos Ventiladores Primários.	39
Figura 22: Gráfico comparativo das reduções de consumo energético por meio do VOD.	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Cálculo de vazão segundo item 22.24.8	7
Tabela 2: Limites de tolerância para gases encontrados no subsolo no Brasil (Fonte: MACHADO,2011).	8
Tabela 3: Regime de trabalho intermitente de acordo com o IBUTG (Fonte: NR-15).....	9
Tabela 4: Comparativo do consumo energético entre operações mineiras (Modificado: CANMET, 2005).	17
Tabela 5: Frota de equipamentos e vazão necessária.	28
Tabela 6: Resumo dos ventiladores principais	29

LISTA DE NOTAÇÕES, SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

NRM: Normas Reguladoras de Mineração.

MTE: Ministério do Trabalho e Emprego.

VOD: Ventilation on Demand

RBM: Raise Boring Machine

CLP: Controlador Lógico Programável

QT: Vazão total de ar fresco em m^3/min

Q1: Quantidade de ar por pessoa em m^3/min (em minas de carvão = $6,0 m^3/min$; em outras minas = $2,0 m^3/min$)

n1: Número de pessoas no turno de trabalho

Q2: $3,5$ ou $2,65 m^3 / min/cv$ (cavalo-vapor) dos motores a óleo diesel

n2: Número total de cavalo-vapor dos motores a óleo diesel em operação

A: Quantidade total em quilogramas de explosivos empregados por desmonte

t: Tempo de aeração (reentrada) da frente em minutos

q: Vazão de ar em $m^3/minuto$ para 1.000 toneladas desmontadas por mês (mínimo de $180 m^3/minuto/1.000$ toneladas por mês)

T: produção em toneladas desmontadas por mês.

P1: Potência em cavalo vapor do equipamento de maior potência em operação;

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.

Tbn: Temperatura de bulbo úmido natural

Tg: Temperatura de globo

Tbs: Temperatura de bulbo seco

Q: Vazão;

P: Pressão;

Pot: Potência;

n: Velocidade de rotação;

D: Diâmetro do ventilador;

w: Densidade do ar.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo Geral.....	3
2.2 Objetivos Específicos	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 Objetivos da ventilação.....	4
3.2 Princípios básicos	5
3.3 Normas regulamentadoras	6
3.4 Cálculo da vazão de ar fresco	6
3.5 Limites de tolerância.....	8
3.6 Dimensionamento	10
3.7 Modelagem computacional.....	10
3.8 Ventsim Visual®	11
3.9 Ventiladores	13
3.10 Leis do Ventilador	14
3.11 Acionamento de ventiladores.....	15
3.12 Controlador lógico programável (CLP) e sistema Pims	15
3.13 Ventilação sob Demanda	16
3.13.1 Controle Manual ou Controle por meio de usuário	17
3.13.2 Tempo do dia – Scheduling.....	18
3.13.3 Eventos programáveis.....	19
3.13.4 Sistema de rastreamento de equipamentos (ou <i>tagging</i>).....	19
3.13.5 Parâmetros ambientais.....	20
4. DESCRIÇÃO DO EMPREENDIMENTO	21
4.1 Geologia.....	21
4.2 Mina.....	22
4.3 Sistema de ventilação.....	25
4.4 Sistema de ventilação sob demanda.....	30
5. METODOLOGIA	34
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
7. CONCLUSÕES.....	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
APÊNDICE	45
APÊNDICE I – Gráficos de potência de todos os ventiladores por hora.	45

Média de consumo dos ventiladores por hora – Sucuri II.....	45
Média de consumo dos ventiladores por hora – Lumiadeira I.	46
Média de consumo dos ventiladores por hora – Sucuri I.	47

1. INTRODUÇÃO

A escolha pela lavra subterrânea leva em consideração aspectos como a profundidade do depósito, morfologia do corpo mineral e relação estéril-minério. A intensa extração mineral que vem sendo realizada desde o início da atividade mineira até hoje, tem tornado a presença de afloramentos superficiais não explotadas cada vez mais rara, popularizando um pouco mais a extração um subsolo. Entretanto, suas incertezas são mais expressivas do que em céu aberto, uma vez que demanda maior detalhamento do modelo geológico para a viabilização das suas atividades. Além disso, o ciclo operacional desse tipo de mineração é bem mais complexo e dinâmico, onde a segurança deve ser tratada como prioridade.

A ventilação é uma atividade crucial para a mineração subterrânea, garantindo sua operacionalização de forma mais segura e eficiente. A atual tendência da indústria mineira de escavar depósitos mais profundos exige maior eficácia da ventilação como um todo, sendo capaz de suprir a demanda de ar na mina com qualidade e quantidade adequadas.

Recentemente líderes das empresas globais de mineração tem discutido um modo mais sustentável de executa-la e soma-se a isso os altos gastos com energia elétrica dentro da atividade mineira. Assim, por representar usualmente mais de 50% do gasto energético em uma mina subterrânea, a ventilação, vem sendo muito pesquisada a fim de otimizar seu funcionamento. Como produto desse estudo, o Sistema de Ventilação Sob Demanda ou VOD foi desenvolvido e vem sendo aprimorado (COSTA, 2017).

Essa nova técnica visa variar a distribuição do fluxo de ar na mina conforme a demanda das atividades executadas. Considerando o dinamismo de uma mina subterrânea quanto às atividades realizadas, equipamentos operando, número de pessoas em subsolo e a localização das frentes de serviço. Além disso, o dimensionamento de um sistema de ventilação considera o pior cenário, ou seja, visa atender a demanda de ar na mina no auge da sua produção, entretanto os mesmos equipamentos são utilizados para cenários

mais amenos não havendo a necessidade de operar o sistema com 100% de sua capacidade.

Nesse contexto, a Mina de Vazante vem investindo na automatização de seu sistema de ventilação com o intuito de acompanhar a tendência do mercado. Os projetos vislumbram sustentabilidade, redução nos gastos com energia elétrica e otimização do uso dos ventiladores. O site Vazante está implementando dois projetos de ventilação sob demanda, sendo um promovido sob responsabilidade da Nexa Resources, onde inversores de frequência foram instalados no sistema principal de ventilação com auxílio de um software para seu controle.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Esse trabalho tem como objetivo descrever o funcionamento de um sistema de ventilação em uma mina subterrânea, as normas que regem o mesmo e mostrar a aplicabilidade do VOD (*Ventilation on Demand*). Para o último tópico será apresentado um estudo de caso para Mina Vazante.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do projeto são:

- Apresentar a Mina Vazante e o funcionamento do seu sistema de ventilação.
- Explicar o projeto de Ventilação Sob Demanda que está em execução.
- Avaliar a economia energética dos resultados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo serão apresentados os objetivos da ventilação, seus conceitos básicos, a legislação vigente sobre a mesma, bem como as diretrizes a respeito de Ventilação sobre Demanda.

3.1 Objetivos da ventilação

A ventilação subterrânea é, em sua essência, a aplicação dos princípios da fluidodinâmica para criar um fluxo de ar nas escavações subterrâneas (HARTMAN, 1997). A principal função de um sistema de ventilação é prover a quantidade de ar necessária para atender as atividades de subsolo em tempo hábil. É a área responsável por fornecer a demanda de ar para o trabalhador na frente de serviço, diluir os gases tóxicos e explosivos, remover o material particulado em suspensão e controlar temperatura e umidade do ar (COSTA, 2017).

De acordo com Hartman *et al.* (1997), esses objetivos podem ser descritos nos três tópicos abaixo:

1. Controle de qualidade
 - a) Controle de gases – vapor, gases e radiação;
 - b) Controle de poeira – particulados.
2. Controle de quantidade
 - a) Ventilação;
 - b) Ventilação auxiliar;
 - c) Exaustão local.
3. Controle de temperatura-umidade (calor sensível e latente)
 - a) Resfriamento;
 - b) Aquecimento;
 - c) Umidificação;
 - d) Desumidificação.

3.2 Princípios básicos

O fluxo de ar em uma mina pode ocorrer de forma natural ou mecânica. O ar se movimenta devido a uma diferença de pressão entre dois pontos. A ventilação natural é, geralmente, causada pela diferença de temperatura do ar que proporciona mudanças em sua densidade, resultando em seu movimento. Enquanto a ventilação mecânica ocorre através de um equipamento, na maioria dos casos um ventilador, responsável por gerar uma diferença de pressão entre as suas extremidades fazendo com que o ar se movimente (COSTA, 2017).

Em um sistema de ventilação o ar fresco entra através de poços verticais (*shafts*), rampas ou galerias de acesso, galeria de transporte ou de minério (lavra), ou qualquer outro tipo de conexão com a superfície. O fluxo de adução passa por frentes de serviço onde os poluentes presentes são adicionados a ele, se transformando em ar viciado, indo em direção aos caminhos de retorno. Esses caminhos vão em direção a superfície por meio de subidas (*raises*), que são galerias inclinadas (MCPHERSON, 1993). Na Figura 1 está representado um circuito básico de ventilação.

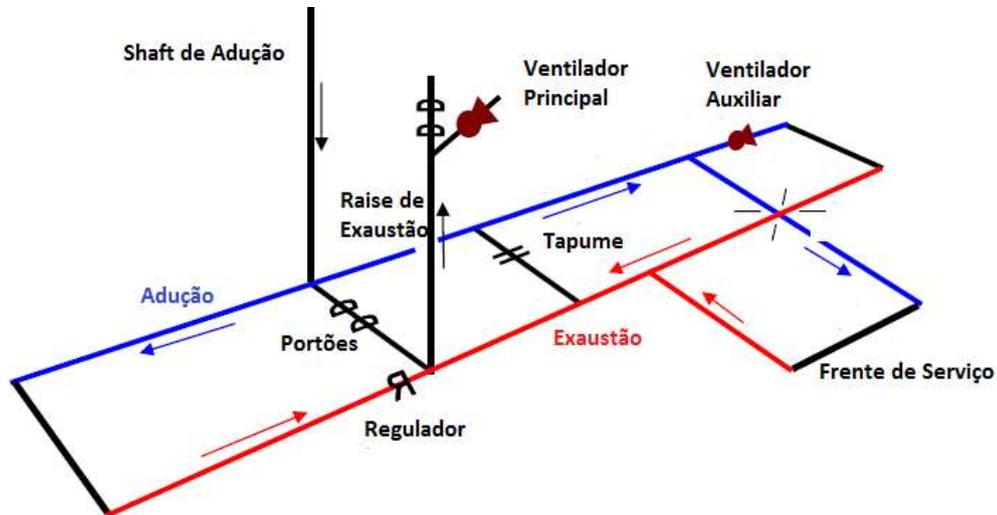


Figura 1- Elementos principais de um circuito de Ventilação (Modificado: MCPHERSON, 1993).

Neste contexto, de acordo com a NRM 06, o ar fresco é definido como aquele que pode ser consumido por trabalhadores e equipamentos; e ar viciado é aquele que já foi utilizado na ventilação de frentes de serviço.

Os ventiladores principais são aqueles que controlam o ar que passa por toda mina, podem ser alocados na superfície ou no subsolo, instalados no topo da chaminé ou da galeria de retorno (MCPHERSON, 1993). Juntamente com esse sistema, podem ser adicionados ventiladores do tipo *boosters* ou reforçadores, esses são utilizados para reduzir a pressão necessária nos ventiladores principais, reduzindo a potência necessária neles (HARTMAN, 1997).

Grande parte das frentes de trabalho tem fluxo de ar percorrendo por ela, porém a ventilação principal não é a ideal para ventilar frentes em desenvolvimento ou “fundo de saco”. As duas principais funções dessa ventilação auxiliar são ventilar esse tipo de região e contribuir com a vazão para o sistema primário de ventilação (HARTMAN, 1997).

3.3 Normas regulamentadoras

O principal ponto de atenção de um projeto de ventilação é atender todos os requisitos legais envolvendo o condicionamento do meio subterrâneo, a fim de garantir a segurança e segurança ocupacional do trabalhador. Nesse intuito, o MTE e o DNPM criaram Normas Regulamentadoras, que estabelecem critérios para o dimensionamento da quantidade de ar fresco com base em diversos parâmetros e estabelecem limites quantitativos para os contaminantes (MACHADO, 2011).

3.4 Cálculo da vazão de ar fresco

Para o cálculo da quantidade de ar necessária em um sistema de ventilação são considerados os seguintes pontos: quantidade máxima de pessoas no turno, quantidade de equipamentos e tipo de óleo diesel utilizado, consumo de explosivos e massa desmontada. Para a ventilação auxiliar, a vazão necessária é calculada de forma diferente, considerando o número de

equipamentos trabalhando de forma simultânea na frente de serviço, ou por vazão de ar por metro quadrado de área na frente de serviço. Sendo que esse último, deve ser considerado para o caso de equipamentos que não são movidos a combustão, considerando uma vazão mínima de 15 metros cúbicos por minuto (MTE, 1999).

O tipo de combustível interfere de forma expressiva na quantidade de ar requerida pela lei. De acordo com a NR 22-24 veículos que operam com diesel com teor de enxofre maior que 50 ppm necessitam de 3,5 m³/min para cada cavalo vapor, enquanto equipamentos que são abastecidos com combustível com teor de enxofre abaixo de 50 ppm necessitam de 2,65 m³/min (MTE, 1999). A Tabela 1 mostra como o cálculo de vazão mínima é feito.

Tabela 1: Cálculo de vazão segundo NR 22 item 24.8

Determinação da vazão de ar fresco conforme disposto no item 24.8 da NR 22	
Parâmetro	Cálculo de Vazão
Número máximo de pessoas ou máquinas com motores a combustão	$Q_T = Q_1 \times n_1 + Q_2 \times n_2$ [m ³ /min]
Consumo de explosivos	$Q_T = 0,5 \times A / t$ [m ³ /min]
Tonelagem mensal desmontada	$Q_T = q \times T$ [m ³ /min]

Onde:

Q_T = vazão total de ar fresco em m³/min

Q_1 = quantidade de ar por pessoa em m³/min (em minas de carvão = 6,0 m³/min; em outras minas = 2,0 m³/min)

n_1 = número de pessoas no turno de trabalho

Q_2 = 3,5 ou 2,65 m³ / min/cv (cavalo-vapor) dos motores a óleo diesel

n_2 = número total de cavalo-vapor dos motores a óleo diesel em operação

A = quantidade total em quilogramas de explosivos empregados por desmonte

t = tempo de aeração (reentrada) da frente em minutos

q = vazão de ar em m³/minuto para 1.000 toneladas desmontadas por mês (mínimo de 180 m³/minuto/1.000 toneladas por mês)

T = produção em toneladas desmontadas por mês.

Para frentes de serviço no caso de operação de um ou mais equipamentos movidos a diesel deverá ser adotada a fórmula:

$$QT = 3,5 (P1 + 0,75 \times P2 + 0,5 \times Pn) [m^3/min]$$

Onde:

QT é a vazão total de ar fresco em m³/s;

P1 é a potência em cavalo-vapor do equipamento de maior potência em operação;

P2 é a potência em cavalo-vapor do equipamento de segunda maior potência em operação;

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

A legislação exige que todas as frentes sejam ventiladas com fluxo de ar fresco, não permitindo reuso ou reaproveitamento do ar utilizado em outro local (MACHADO, 2011).

3.5 Limites de tolerância

A legislação estabelece limites quantitativos para os gases tóxicos mais comuns no subsolo, velocidade do ar e condições de temperatura ambiente. A Tabela 2 mostra os valores máximos de tolerância para esses gases no Brasil.

Tabela 2: Limites de tolerância para gases encontrados no subsolo no Brasil (Fonte: MACHADO,2011).

Gás	Limite de tolerância
CO	39 ppm
CO ₂	3900 ppm
NOX	12 ppm
NH ₃	8 ppm
H ₂ S	8 ppm
SO ₂	2 ppm
O ₂	19,5%
NH ₄	1%

Velocidade do ar também possui limites de acordo com o local considerado. Para locais frequentados por pessoas a NR 22-24 estabelece uma velocidade mínima de 0,2 m³/segundo

e máxima de 8,0 m³/segundo. Em locais dedicados exclusivamente para ventilação, a velocidade máxima poderá alcançar 10 m³/segundo, caso haja autorização do DNPM, esse valor poderá ser mais alto (MACHADO, 2011).

A NR 15 estabelece limites de tolerância para temperatura através do Índice de Bulbo Úmido Termômetro de Globo, descrito pelas equações abaixo.

Ambientes internos ou externos sem carga solar:

$$IBUTG = 0,7 t_{bn} + 0,3 t_g$$

Ambientes externos com carga solar:

$$IBUTG = 0,7 t_{bn} + 0,1 t_{bs} + 0,2 t_g$$

Onde:

t_{bn} = temperatura de bulbo úmido natural

t_g = temperatura de globo

t_{bs} = temperatura de bulbo seco.

Caso os índices medidos estejam elevados, a legislação estabelece critérios para regimes de trabalho intermitentes conforme a Tabela 3.

Tabela 3: Temperatura mínima em regime de trabalho intermitente de acordo com o IBUTG (Fonte: NR-15)

REGIME DE TRABALHO INTERMITENTE COM DESCANSO NO PRÓPRIO LOCAL DE TRABALHO (por hora)	LEVE (°C)	MODERADA (°C)	PESADA (°C)
Trabalho contínuo	até 30,0	até 26,7	até 25,0
45 minutos trabalho 15 minutos descanso	30,1 a 30,5	26,8 a 28,0	25,1 a 25,9
30 minutos trabalho 30 minutos descanso	30,7 a 31,4	28,1 a 29,4	26,0 a 27,9
15 minutos trabalho 45 minutos descanso	31,5 a 32,2	29,5 a 31,1	28,0 a 30,0
Não é permitido o trabalho, sem a adoção de medidas adequadas de controle	acima de 32,2	acima de 31,1	acima de 30,0

3.6 Dimensionamento

De acordo com Brake (2009, *apud* MACHADO, 2011) o fator mais importante em um projeto de ventilação refere-se ao dimensionamento da quantidade de ar fresco circulando no ambiente subterrâneo. Determinar de forma errônea esse volume de ar pode acarretar efeito em cascata, prejudicando o dimensionamento de todos os demais parâmetros. Todos os fatores regulamentadores apresentados no tópico anterior devem ser considerados, além das especificações da mina em questão, avaliando de forma sistemática a produção, o número de pessoas e equipamentos, e as atividades auxiliares ao longo de toda vida útil do empreendimento.

Não deverá ser determinado apenas o volume de ar necessário, mas também a forma de distribuí-lo ao longo da ampliação das escavações, prevendo o tipo de infraestrutura que será construída visando adequar o sistema ao decorrer da vida útil da mina (*life of mine*). O balanço de massa do sistema deverá ser calculado, estabelecendo as entradas e saídas do sistema, para que o dimensionamento dos ventiladores principais seja feito, determinando os investimentos necessários para aquisição de capital e o custo operacional para o sistema de ventilação (MACHADO, 2011).

Recentemente, as minas subterrâneas atingiram um *layout* muito complexo, tornando difícil projetar e calcular manualmente um sistema de ventilação para atendê-las. *Softwares* de simulação, capazes de realizar a modelagem computacional de circuitos de ventilação, possibilitando prognosticar a situação de um ambiente em subsolo e a vazão necessária para atendê-la, nas condições atuais e futuras, devem ser utilizados (MCPHERSON, 1993).

3.7 Modelagem computacional

As ferramentas de modelagem computacional têm sido indispensáveis para a análise de circuitos de ventilação, devido à grande variedade de aplicativos existentes e a evolução dos computadores, se tornando capazes de processar layouts cada vez mais complexos. A avaliação de redes de ventilação por métodos convencionais é muito complicada, ficando limitada

apenas a pequenos setores de uma mina. Por conta disso, o uso de técnicas computacionais se torna essencial para otimizar o design de sistema de ventilação, permitindo que modificações e simulações sejam feitas de forma direta com o intuito utilizar os recursos de maneira eficaz e reduzindo custos (PINTO *et al.*, 2003).

Para que o modelo criado seja representativo, a coleta de uma série de dados em campo é indispensável, uma vez que os mesmos são dados de entrada (inputs) para o modelo. Circuitos de ventilação possuem características singulares, assim, um banco de dados confiável deve ser utilizado para melhor representá-los (PINTO *et al.*, 2003).

Além de permitir uma visão de futuro, esses sistemas possibilitam artifícios para a tomada de decisões, diagnósticos de não conformidades e elaboração de um plano para mudanças (MACHADO, 2011).

3.8 Ventsim Visual®

O software Ventsim Visual® foi introduzido no mercado de ventilação em 2009 como ferramenta para melhorar o design visual e otimizar sistemas de ventilação. É o sistema utilizado pela mina Vazante para simulação do sistema de ventilação.

O programa é capaz de simular e registrar vazões, variações de pressão e rodar cenários hipotéticos de planejamento de mina. Em caso de acidentes, o programa simula contaminantes como fumaça, gases e poeira. Calcula toda a distribuição do fluxo de ar ao longo da mina, considerando a influência dos ventiladores, fator de atrito e resistências associadas, e condições termodinâmicas do circuito (MACHADO, 2011).

O Ventsim Visual® é capaz de importar dados com facilidade dos programas mais utilizados pelo planejamento de lavra como AutoCad®, Datamine® e Deswik®. Fator que torna mais dinâmicas a simulação de um projeto de mineração e ações do planejamento em curto, médio e longo prazo, sendo possível separá-las em “estágios” com o provável layout na unidade de tempo desejada. Segundo Machado (2011) o programa oferece ao usuário as seguintes possibilidades:

1. Simulações de fluxo de ar de uma mina;

2. Análise de simulações para prováveis frentes de desenvolvimento;
3. Planejar a ventilação em todas as etapas da vida útil da mina;
4. Selecionar ventiladores principais e secundários, fornecendo a pressão, potência e vazão demandada pelo circuito;
5. Prever concentração de poluentes em casos críticos.

A mina Vazante utiliza esse programa devido a todas as características explicitadas acima que possibilitam uma grande variedade de aplicações e, juntamente com o banco de dados coletado por visitas em campo, uma boa aderência entre modelo e realidade. A Figura 2 mostra uma representação do modelo Ventsim Visual® de uma região da mina Vazante, em que vermelho representa a exaustão (ar utilizado), em azul a adução (ar novo) e em marrom as áreas de possível reciclo.

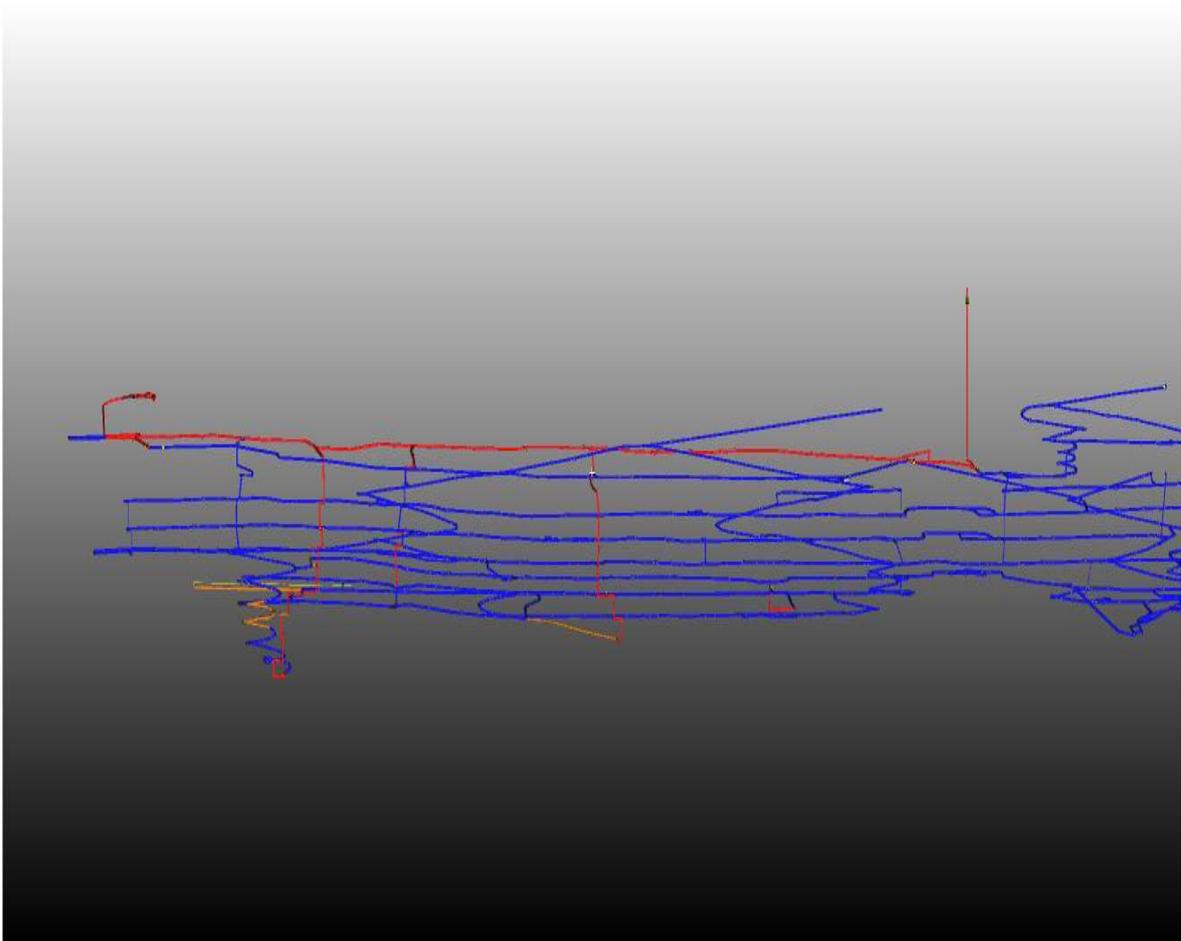


Figura 2: Modelo Computacional da Mina Vazante região do Lumiadeira com o Ventsim Visual®.

3.9 Ventiladores

Sistemas de ventilação são compostos por ventiladores conectados a dutos. Na ventilação subterrânea as galerias correspondem aos dutos. Os ventiladores são equipamentos que convertem energia mecânica em energia fluida, fornecendo a pressão para superar as perdas de carga e levar ar até o local onde o mesmo é necessário (HARTMAN, 1997). Segundo Costa (2017) os principais elementos que compõem um ventilador são: motor, hélice e carcaça. Também é composto por aberturas para a entrada e saída de ar.

Existem dois tipos principais de ventiladores definidos por suas características mecânicas: os ventiladores axiais e os ventiladores centrífugos (HARTMAN, 1997). Os axiais possuem um impulsor onde as pás ficam instaladas em uma estrutura aerodinâmica responsável por realizar um movimento rotacional na seção cilíndrica da carcaça. A entrada do ar corre perpendicularmente ao impulsor ocasionando uma força rotacional por conta do seu momento de giro. Nos centrífugos, a rotação do impulsor ou hélice ocorre na forma de espiral e a entrada de ar advém de um ou dois orifícios posicionados lateralmente ao impulsor. Todo o ar coletado é direcionado na direção radial pelo difusor (COSTA, 2017). A Figura 3 mostra uma representação esquemática desses dois tipos de ventiladores.

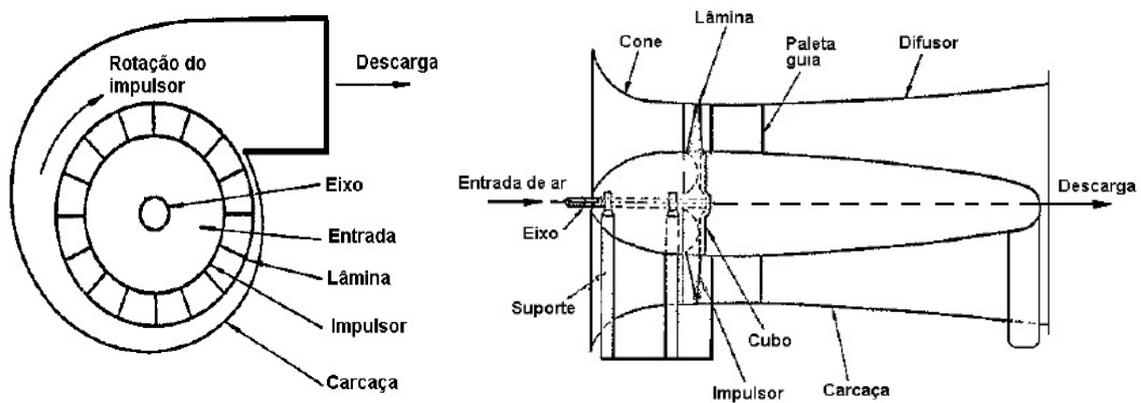


Figura 3: Representação esquemática dos dois tipos de ventiladores, centrífugo (esq.) e axial (dir.) (VUTUKURI e LAMA, 1986 Apud COSTA, 2017).

3.10 Leis do Ventilador

De acordo com Hartman (1997) o comportamento de ventiladores, geralmente, está relacionado com as condições de pressão e vazão em que o equipamento opera, e essas condições estão previstas nas curvas dos ventiladores. Entretanto, existem outras variáveis que interferem na performance de ventiladores que tem influência considerável. São fatores como o diâmetro do ventilador, peso específico do ar, velocidade de rotação e o ângulo da pá. Essas equações são conhecidas como leis do ventilador, e podem ser utilizadas para um ponto de operação do ventilador dentro de sua curva característica. Essas equações são representadas a seguir:

Vazão:

$$Q \propto nD^3, Q = nD^3, \text{ ou } Q_2 = \frac{n_2}{n_1} \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^3 Q_1 \quad (1)$$

Pressão:

$$P \propto n^2 D^2 w, H = n^2 D^2 w, \text{ ou } H_2 = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 \frac{w_2}{w_1} H_1 \quad (2)$$

Potência:

$$\text{Pot} \propto n^3 D^5 w, \text{ Pot} = n^3 D^5 w, \text{ ou } \text{Pot}_2 = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^5 \frac{w_2}{w_1} \text{Pot}_1 \quad (3)$$

Sendo:

Q = Vazão;

P = Pressão;

Pot = Potência;

n = Velocidade de rotação;

D = Diâmetro do ventilador;

w = Densidade do ar.

As leis do ventilador possibilitam determinar curvas características para um ventilador com velocidade, densidade do ar e dimensões variadas a partir de uma curva previamente conhecida (COSTA, 2017).

3.11 Acionamento de ventiladores

Durante o acionamento de um ventilador, painéis de partida são essenciais para o bom funcionamento do equipamento, uma vez que a corrente de partida necessária para ligá-lo é bem mais alta que sua corrente de funcionamento. Dessa forma, o uso deles é essencial para o bom funcionamento e para a vida útil do motor (BRUNA *et al.*, 2012).

Com a função de reduzir os impactos da partida direta nos ventiladores, chaves de partida são utilizadas para suavizar a corrente necessária para retirar o equipamento da inércia. Entre as chaves existentes no mercado se destacam a Chaves do tipo “Soft-starter” e com inversor de frequência (COSTA, 2017).

Os “soft-starters” têm a capacidade de controlar a relação entre corrente e torque durante a partida de motores elétricos, não provocando trancos no sistema, limitando a corrente de partida, proporcionando paradas suaves. Porém, esse tipo de chave tem função apenas para ligar e desligar equipamento, não é capaz de variar rotação de equipamento.

Os inversores de frequência são aparelhos capazes de transformar a corrente contínua em alternada, e a partir daí transformá-la em tensão de frequência de amplitude ajustável. Os inversores de frequência permitem o controle da velocidade de rotação de ventiladores (BRUNA *et al.*, 2012).

3.12 Controlador lógico programável (CLP) e sistema Pims

O CLP é um dos controladores mais utilizados na indústria, funcionando como um computador industrial, possui uma memória interna programável que possibilita programar implementações em um determinado sistema, como por exemplo lógica, sequenciamento e

temporização, controlando a entrada e saída de vários tipos de equipamentos e processos (COSTA, 2017).

O sistema Pims é um instrumento de gestão de informações de um ou mais processos que recebe dados, os registra e disponibiliza por meio de tabelas, gráficos e relatórios. Seu objetivo é de armazenar registros na forma de um banco de dados central, realizando tratativas dos mesmos para que se tornem um tipo de conhecimento sobre o processo, contribuindo para a tomada de decisões. As fontes desses dados podem ser um sistema supervisório ou um CLP (SOUSA, 2014).

3.13 Ventilação sob Demanda

De acordo com Tran-Valade and Allen (2013) a Ventilação sob Demanda pode ser definida como a habilidade de direcionar o ar em uma mina subterrânea para a área que necessita dele, conforme as atividades realizadas. A aplicação desse sistema requer conhecimento completo e detalhado do circuito de ventilação da mina, das atividades ocorrendo em subsolo e da legislação vigente. Para o funcionamento da VOD, os locais de demanda de ar devem ter a infraestrutura necessária, as demandas de ar para cada processo operacional, perfuração, carregamento, transporte e desmonte devem ser calculadas (DICKS, 2017).

A infraestrutura a ser instalada deverá ser capaz de alterar o fluxo de ar nas galerias, permitindo que reguladores, portas e principalmente ventiladores possam operar em setups/frequências variadas (DICKS, 2017).

Hardcastle et al. (2006, *apud* ACUÑA et al, 2014) afirmam que 40% de todo o tempo de operação dos ventiladores auxiliares, trabalhando em galerias “fundo de saco”, ocorre na ausência de pessoas ou equipamentos nesses locais.

O consumo energético com ventilação é extremamente relevante quando comparado com as demais atividades mineiras em subsolo. A Tabela 4 abaixo representa o custo em dólar por tonelada, referente ao valor gasto em diferentes operações.

Tabela 4: Comparativo do consumo energético entre operações mineiras (Modificado: CANMET,2005).

Custo de energia do Canadá, 2000 - 11 minas (CANMET,2005) - \$/t			
Operação	Mínimo	Máximo	Relativo Ventilação
Perfuração	0,13	0,72	0,25
Desm. Explosivo	0,21	3,23	1,11
Carregamento	0,11	0,33	0,11
Transporte	0,01	0,25	0,09
Britagem Subt.	0,01	0,08	0,03
Içamento	0,10	0,64	0,22
Transporte Usina	0,01	0,64	0,22
Ventilação	1,11	2,92	1,00
Enchimento	0,03	0,35	0,12
Desaguamento	0,09	0,42	0,14
Outras At. Suporte	0,05	0,35	0,12

Existem cinco tipos de estratégias utilizadas para o controle de ar na ventilação sobre demanda (ACUÑA *et al.*, 2016):

1. Controle manual ou Controle por meio de usuário
2. Tempo do dia - Scheduling
3. Eventos programáveis
4. Sistema de rastreamento de equipamentos ou tagging
5. Parâmetros ambientais

3.13.1 Controle Manual ou Controle por meio de usuário

Esse sistema considera o nível 1 de VOD, permite controlar ou definir previamente (*setar*) pontos operacionais diferentes para diferentes componentes de um sistema de ventilação. Cria a oportunidade de variar a rotação de ventiladores principais e secundários, seja através de um *soft-starter*, permitindo apenas desligar ou ligar o equipamento remotamente, ou por meio de um inversor de frequência onde a rotação desejada para aquele motor pode ser estabelecida. Geralmente os auxiliares apresentam somente o sistema on/off, porém podem

ser instalados inversores de frequência para controle mais específico dos mesmos (ACUÑA *et al.*, 2016).

As portas e reguladores são estruturas de controle que podem ser utilizadas para regular a abertura de orifícios de um caminho de ventilação. Através dos mesmos é possível variar a resistência e o fluxo de ar em uma galeria. Entretanto as funções desses dois componentes são bem diferentes, enquanto os reguladores têm a função de modificar o tamanho de aberturas para modular o fluxo de ar, os portões são responsáveis por isolar galerias do circuito de ventilação, se mantendo abertos ou fechados, determinando a vazão naquela região onde estão instalados, funcionando como um sistema de abertura fixa (ACUÑA *et al.*, 2016). A Figura 4 mostra um tipo de regulador de vazão para galerias de ventilação.



Figura 4: Regulador de vazão para galerias de ventilação (Fonte: Kashnikov, sd).

3.13.2 Tempo do dia – Scheduling

A segunda estratégia de VOD é o tempo do dia (*scheduling*) que representa o conceito de programar diferentes pontos de funcionamento para ventiladores, reguladores e portões baseado em um determinado momento do dia, seguindo um tipo de cronograma. Para minas onde o sistema de sensores de medição não estão totalmente difundidos ou não existem, esse sistema permite estabelecer sequências de redução com base no horário. Portanto, nesse caso o gatilho de ativação da VOD está relacionado apenas com o tempo, ou seja, não

considerados parâmetros ambientais do condicionamento subterrâneo (ACUÑA *et al.*, 2016).

3.13.3 Eventos programáveis

De acordo com Tran-Valade e Allen (2013) o controle por meio de eventos programáveis é o gatilho de alteração do ponto de funcionamento do sistema por meio de eventos configurados. Também é conhecido como “gatilho de ação” funcionando com inputs alternativos que não envolvem tempo e parâmetros ambientais. Esse método tem um potencial significativo para a melhoria da ventilação após um desmonte ou para o acionamento de ventiladores em cascata, para o caso de um booster ser ativado somente quando um outro ventilador auxiliar estiver funcionando (ACUÑA *et al.*, 2016).

3.13.4 Sistema de rastreamento de equipamentos (ou *tagging*)

O sistema de rastreamento é um avanço para determinar a distribuição de pessoas e equipamentos na mina, contribuindo para a segurança pois evita a aproximação dos mesmos. Para seu funcionamento é necessário a implementação de um sistema de marcação e de acompanhamento, e que haja comunicação entre essas informações e o sistema de ventilação. Portanto, o fluxo e a quantidade de ar ficam direcionados para onde os equipamentos estão, respeitando a demanda de ar estabelecida pela legislação colocada dentro da base de dados do software. Assim, esse sistema é capaz de atingir o objetivo da ventilação sob demanda e levar a quantidade de ar determinada por lei para as frentes de trabalho no momento da operação (ACUÑA *et al.*, 2016).

3.13.5 Parâmetros ambientais

A VOD, por meio de parâmetros ambientais, se utiliza de sensores para a medição de fatores como gases tóxicos, poeira e aumento de temperatura coletados em tempo real para determinar o controle da ventilação.

Essa metodologia pode funcionar de duas formas, através do método de segurança contra falha, que estabelece limites de segurança, fazendo que o sistema funcione com maior vigor ao atingi-los, e por meio do controle por ultimato, no qual a velocidade dos ventiladores aumenta somente ao atingir o limite estabelecido pela lei. Dessa forma o gasto energético é estabelecido de acordo com as condições de higiene ocupacional da frente de serviço onde os sensores estão instalados (ACUÑA *et al.*, 2016).

De acordo com Acuña *et al* (2016) as legislações canadense e chilena não permitem o funcionamento desse tipo de ventilação sob demanda para o controle por ultimato, uma vez que ele permite que o limite de contaminantes ultrapasse, por um espaço de tempo, os valores estabelecidos pela norma vigente nesses países.

4. DESCRIÇÃO DO EMPREENDIMENTO

A mina Vazante pertence ao grupo Nexa Resources, recebeu esse nome devido ao município onde localiza. A cidade, segundo último censo do IBGE (2014), tem cerca de 20 mil habitantes e está localizada no noroeste do estado de Minas Gerais, ficando a aproximadamente 500 km de Belo Horizonte, a capital mineira. A Figura 5 mostra a posição no mapa.



Figura 5: Localização do município de Vazante (Fonte: Wikipédia, 2018)

O principal metal produzido é o zinco, tendo o chumbo e a prata como subprodutos. A mina é relativamente rasa, o nível mais profundo está com aproximadamente 500 m de profundidade em relação a superfície, entretanto possui atualmente mais de 5 km de extensão. A extração do minério é feita basicamente por dois métodos VRM e *Sublevel Open Stope*. A produção é de 4.000 t/dia de minério. O teor médio extraído é de 11% de zinco.

4.1 Geologia

O distrito zincífero de Vazante possui uma série de depósitos, eventos e indicações de zinco. Associado ao complexo de minas subterrâneas e céu aberto está o depósito Vazante condicionado por uma zona de brechas hidrotermais tectonizadas (CPRM, 2015).

Segundo Charbel (2015) o ambiente geológico da Mina Vazante está associado a uma estrutura tectônica chamada Zona de Cisalhamento Vazante ou falha Vazante, que atravessa discordantemente uma sequência de rochas carbonáticas. Essa falha possui mergulho de 60°/70° e direção de 320° e proporcionou as condições para a percolação do fluido hidrotermal mineralizante. A Figura 6 representa o perfil geológico.

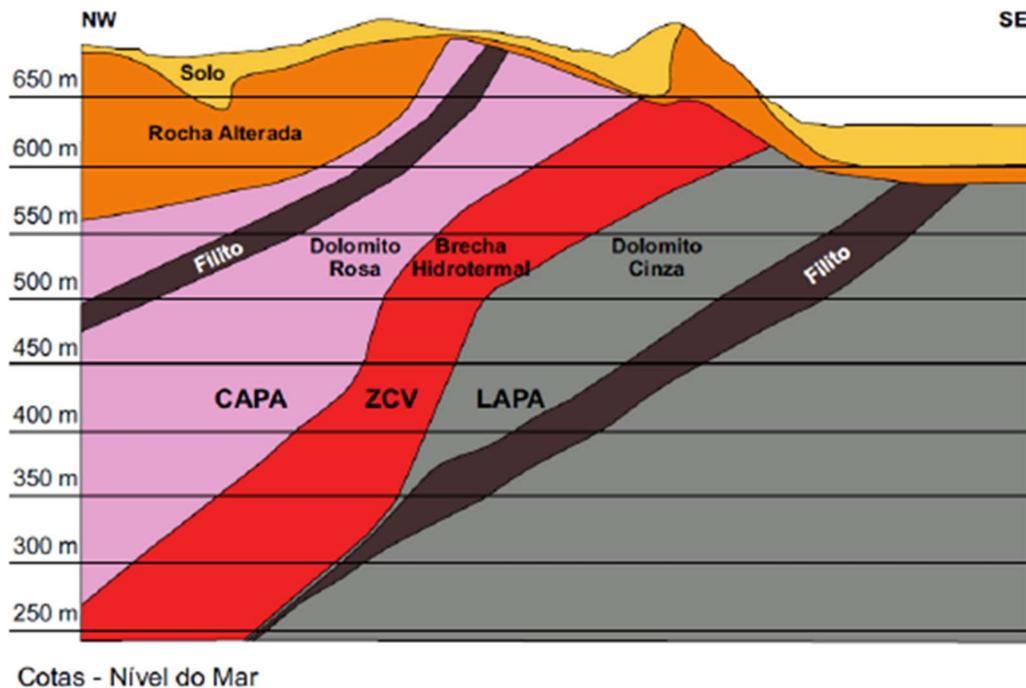


Figura 6: Perfil Geológico (Fonte: CHARBEL, 2015).

As litologias presentes são a brecha hidrotermal ou willemítica e as sequências pelito-carbonáticas compostas pelos dolomitos cinza e rosa, e o filito carbonático (CHARBEL, 2015). O corpo mineral tem formato lenticular e o mineral minério é a willemita, um silicato de zinco.

4.2 Mina

O complexo Vazante é composto por duas minas: Vazante e Extremo Norte, sendo que a primeira se subdivide em duas regiões que são chamadas de Sucuri, ao norte, e Lumiadeira,

ao sul. Como mencionado anteriormente, o nível mais profundo da mina está a 500 metros de profundidade e atualmente o comprimento da mina Vazante supera os 5 km. A mina do Extremo Norte tem dimensões consideravelmente menores com cerca de 300 m de profundidade e menos de 2 km de extensão. O Planejamento de longo prazo visa a união das duas minas até o fim da vida útil do projeto, contando com a escavação de uma nova região o Sucuri Norte, atingindo 10 km de extensão. A Figura 7 mostra o perfil longitudinal da mina vazante ao final de sua vida útil.

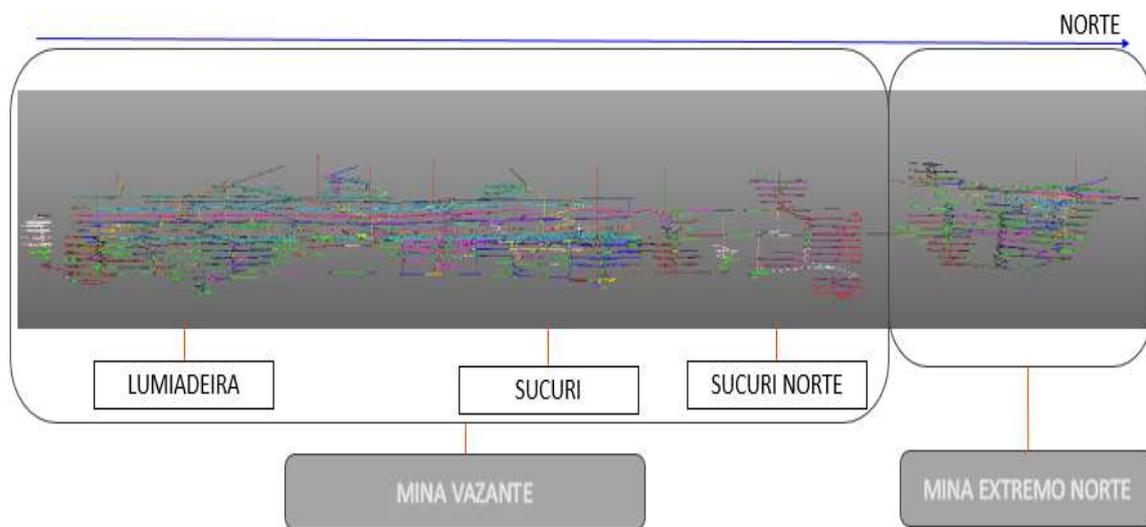


Figura 7: Perfil Longitudinal da Mina Vazante e Extremo Norte.

Existem duas rampas de acesso para a mina Vazante, existindo conexões em subsolo entre as regiões. Além disso há um *shaft* operante para trânsito de pessoas que dá acesso a estação de bombeamento localizada ao centro da escavação e outro em construção que dará acesso a nova estação de bombeamento localizada na região do Sucuri. A mina do Extremo Norte conta com uma rampa de acesso e um caminho de saída de emergência.

Ao longo da escavação, diferentes tipos de suporte são utilizados devido a variabilidade do maciço rochoso. Os tipos de contenção mais utilizados são os tirantes com resina, cabeamento e concreto projetado. No caso de rochas alteradas devido a percolação de água são utilizadas cambotas. O desenvolvimento da mina envolve quatro tipos principais de galerias, as rampas para acesso aos níveis, as galerias de transporte ou GTs no interior do

nível, as galerias de minério ou GMs onde estão localizadas os blocos de lavra e as galerias de pesquisa ou GPs voltadas para a sondagem. Para regiões onde o fluxo de água é constante, torna-se necessário a escavação de galerias de drenagem ou GDs. Para a conexão entre rampas e as demais galerias existem as galerias de acesso, e para conectar as galerias existem travessas entre elas. O ciclo de desenvolvimento segue as etapas ilustradas pela Figura 8.

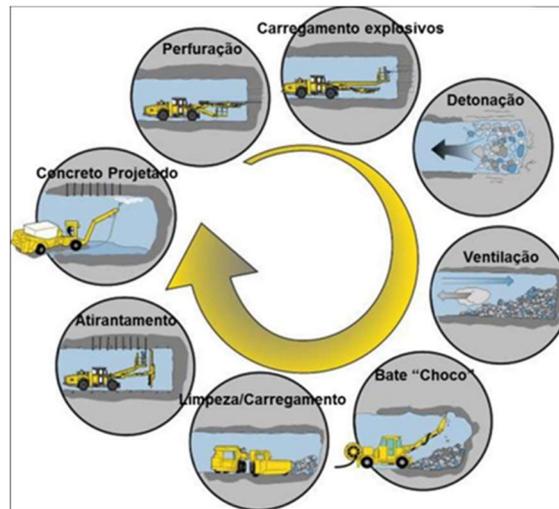


Figura 8: Ciclo operacional desenvolvimento (PAIVA, 2018).

Os métodos de lavras utilizados são o VRM e *Sublevel Open Stope*, com perfuração realizada por *fandrills*.

O método VRM utiliza de perfuração ascendente e descendente de forma paralela ou radial. Os painéis de lavra possuem altura de no mínimo 4 metros, comprimento vertical de aproximadamente 30 metros e largura de 60 metros para cada nível. São conectados 3 níveis por bloco. O VRM é utilizado para corpos minerais com inclinação superior a 45° para garantir o escoamento do minério. Existem três subdivisões essenciais para a detonação do bloco de lavra: as faces livres balizadas pelas travessas e definidas pelo contato do minério, a *undercut* que representa abertura na parte inferior do realce e a *overcut* que representa abertura na parte superior (ANDRADE FILHO, 2015). Após a detonação e limpeza de cada painel há o enchimento do bloco com *rock fill* para a detonação do próximo. Há *rib pillars* próximos às travessas para manter a estabilidade da escavação e *sill pillars* no realce lavrado por último. A Figura 9 mostra uma representação de um *stope* do complexo Vazante. A

mina, conforme Silva (2018), já utilizou o método corte e enchimento para cerca de 15% do corpo de minério, que apresentava mergulho entre 30-45°.

VRM (Vertical Retreat Mine)

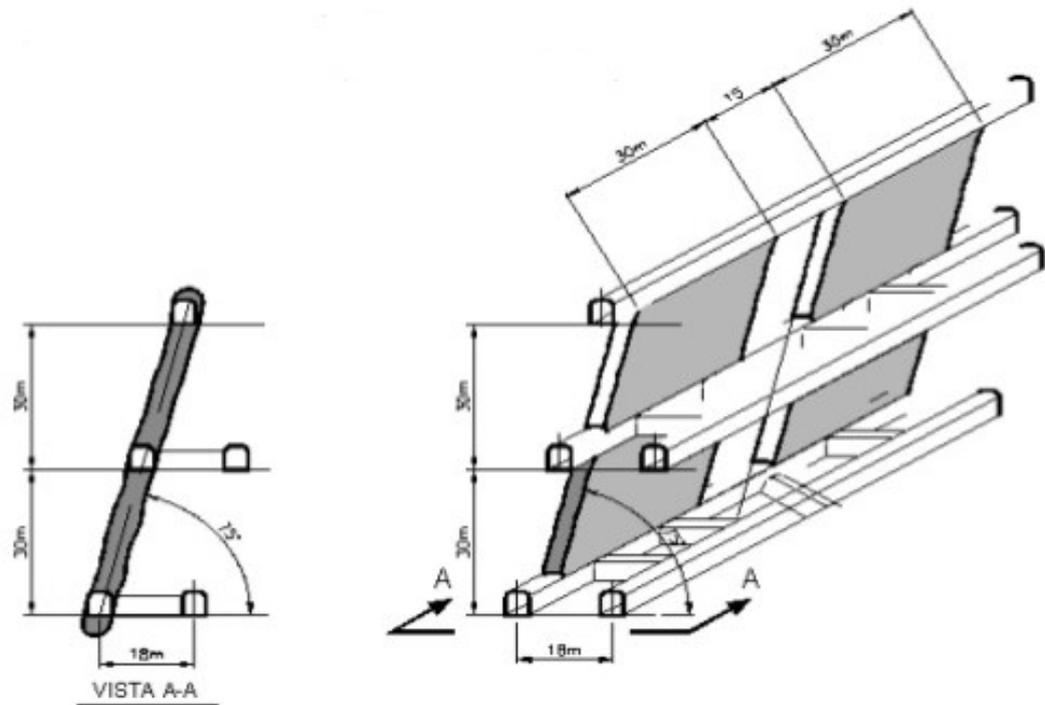


Figura 9: Blocos de lavra VRM na Mina Vazante (Fonte: Nexa Resources).

O método de realce em subníveis (*Sublevel Open Stope*), utilizado em Vazante, lavra blocos das mesmas dimensões que o VRM, entretanto a perfuração é somente ascendente. Um sill pilar é deixado em todos os níveis lavrados e não há enchimento.

4.3 Sistema de ventilação

O sistema de ventilação da mina Vazante conta com 4 poços de exaustão, dois no Lumiadeira e dois no Sucuri. Os ventiladores foram estrategicamente instalados para atender a demanda de vazão em toda mina. Por serem especificados como exaustão, os ventiladores geram uma pressão negativa na mina, forçando a entrada de ar. A adução da mina é feita pelas duas rampas de acesso e dois *shafts*. As duas regiões da mina se conectam no subsolo. A mina do

Extremo Norte possui um sistema de ventilação isolado dos demais por não estar conectada, com isso essa mina possui um poço de exaustão e a adução é feita pela rampa. A saída de emergência fica no interior do poço, dessa forma é necessário o desligamento dos ventiladores para uso. A Figura 10 mostra um fluxograma simplificado da ventilação na Mina Vazante. O vermelho representa a exaustão da mina e o azul a adução.

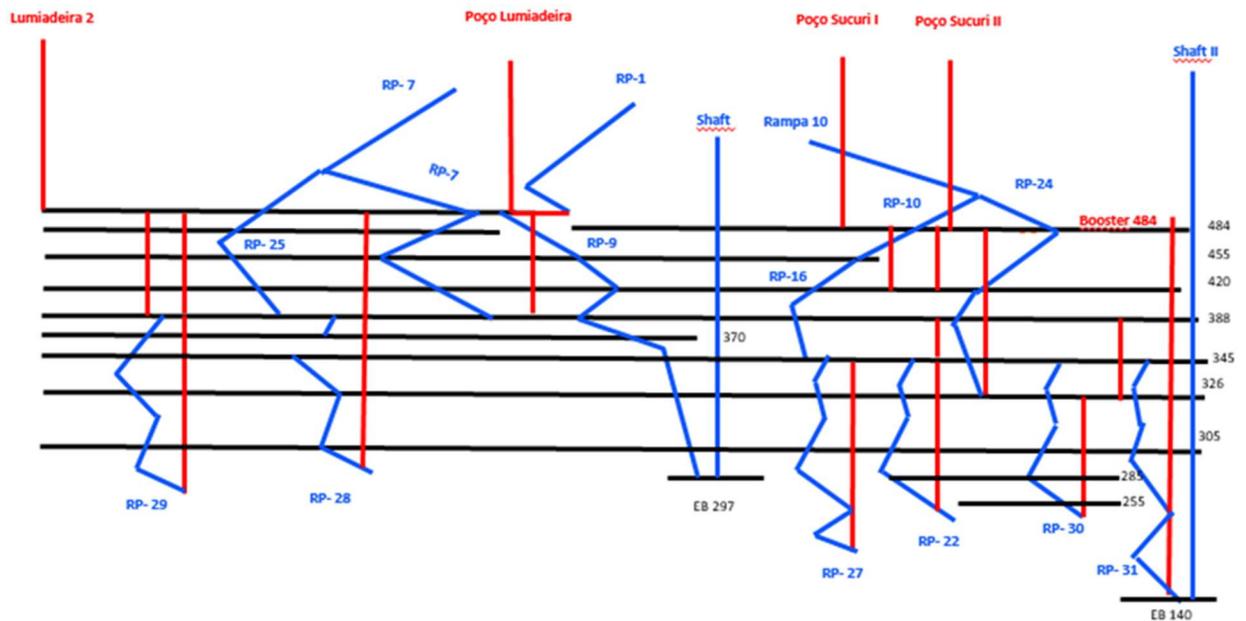


Figura 10: Fluxograma simplificado da Mina Vazante.

Os poços de ventilação da região do Sucuri são chamados de Sucuri I e Sucuri II, e possuem dois e três ventiladores axiais instalados na vertical, respectivamente. As escavações são feitas por perfuratriz *raise boring machine* (RBM) e suas seções são de 1,6 e 3 metros, possuindo mais de 100 metros de comprimento até a superfície. A Figura 10 mostra o poço de ventilação Sucuri II.



Figura 11: Poço de ventilação Sucuri II.

A região do Lumiadeira possui um poço de ventilação vertical escavado com RBM com diâmetro de 3 metros chamado de Lumiadeira I. Para o Lumiadeira II foi feita uma escolha econômica (*trade-off*) entre a perfuração de um poço vertical e a construção de uma rampa, e a construção da rampa mostrou-se mais viável. Portanto, para sua instalação foi construída uma rampa e, a 100 metros do desemboque para a superfície, foi escavado uma região com grandes proporções, onde foi construído um muro e os ventiladores foram instalados. A Figura 12 mostra os ventiladores do Lumiadeira II instalados.



Figura 12: Instalação Lumiadeira II.

Todo o sistema de ventilação foi dimensionado conforme o item 22.24.8 da NR 22, de forma a adequar a ventilação à legislação vigente. Dessa forma é preciso avaliar a número máximo de pessoas ou equipamentos, o consumo de explosivos e massa total desmontada.

A frota considerada para o dimensionamento da ventilação para o ano de 2018 está mostrada na Tabela 4, juntamente com a vazão de ar necessária para cada um deles, levando em consideração o fator de utilização de cada equipamento.

Tabela 5: Frota de equipamentos e vazão necessária.

EQUIPAMENTO	Potência		Ano 2018		
	(CV)	Utilização (%)	Qtd.	(CV Total)	(m³/s)
Jumbo	76	35	6	162	9
Caminhão Volvo A30	361	65	15	3520	204
LHD R1700	358	65	8	1862	108
Boltec	75	37	4	111	6
Scaler	350	47	7	1152	67
Cabolt	150	38	4	230	13
Fandrill S7D	78	45	3	105	6
Caminhão comboio	270	43	1	98	6
Plataforma Normet	131	75	3	253	15
Plataforma Dux	159	66	2	178	10
Spraymec	75	61	3	116	7
Retroescavadeira	101	38	3	98	6
Carregadeira L 110F	231	63	1	123	7
Caminhão betoneira	290	55	3	406	24
Veículo apoio	122	65	3	270	16
Carregadeira 950	199	60	1	101	6
Caminhão emulsão	188	43	3	205	12
Patrol	150	68	2	173	10
TOTAL			69	9161	531

Considerando uma massa anual desmontada de 2.040.500 toneladas e uma massa de explosivos de 121.650 kg podemos fazer o dimensionamento da quantidade de ar fresco conforme Tabela 5.

Tabela 5: Ventilação total necessária – mina Vazante.

VENTILAÇÃO TOTAL NECESSARIA - MINA VAZANTE 2018			
Vazão para pessoas e equipamentos (m ³ /s)	Vazão para explosivos por turno (m ³ /s)	Vazão para tonelada desmontada (m ³ /s)	Volume mínimo de ar conforme NR.22.24.8 (m ³ /s)
538	11	510	538

Os ventiladores principais foram dimensionados para atingir o volume de ar de 538 m³/s. A capacidade nominal do sistema é de 610 m³/s. A Tabela 6 mostra um resumo das especificações técnicas dos ventiladores.

Tabela 6: Resumo dos ventiladores principais

Resumo dos ventiladores principais				
Poço	Potência Unitária (CV)	Vazão Unitária (m ³ /s)	Pressão Total (Pa)	Quantidade
Sucuri I	250	50	2450	2
Sucuri II	200	60	1440	3
Lumiadeira I	250	50	2450	3
Lumiadeira II	350	60	2970	3

Os raises escavados entre os níveis são, em sua grande maioria, perfurados por fandrill e detonados, para esse caso sua seção é quadrada de 3 m x 3 m e seu comprimento pode chegar a 50 metros. Essas escavações fazem a conexão entre níveis e permitem que o ar poluído chegue até os ventiladores principais e sejam exauridos da mina. A distância longitudinal entre eles é de cerca de 400 metros, obedecendo o dimensionamento dos ventiladores secundários.

Os ventiladores auxiliares são direcionados para as frentes em desenvolvimento, seguindo as diretrizes determinadas pela NR 22, considerando frente padrão com um caminhão e uma carregadeira. Para atender a essas condições são necessários aproximadamente 27 m³/s passando por um duto com 1,2 m de diâmetro. Entretanto, as distâncias descritas podem ser alteradas de acordo com as dimensões da galeria a ser desenvolvida. Dutos com 1 m são usados para atender galerias mais baixas, por exemplo, sempre respeitando a vazão

delimitada pela lei. O posicionamento desses ventiladores varia de acordo com a localização da lavra e do desenvolvimento.

Em regiões já exauridas, sem o trânsito de pessoas e dedicadas somente para o retorno de ventilação, são construídos tapumes de alvenaria, evitando fugas no sistema e a mistura do ar fresco e poluído. Esses componentes são responsáveis por evitar desperdícios no sistema principal de ventilação, o que pode ser prejudicial à eficácia do circuito. Para locais onde ainda existe o fluxo de pessoas, são construídos portões, possibilitando o transporte sem prejudicar a ventilação, porém os mesmos devem ser fechados após a passagem.

4.4 Sistema de ventilação sob demanda

A fim de reduzir os gastos energéticos e otimizar o uso dos ventiladores principais foi feito um estudo de viabilidade da implementação do VOD. O gasto com energia elétrica desses equipamentos representa cerca de 7% de toda unidade e 40% do consumo da mina. Para o último caso não foi considerado o bombeamento de água em subsolo, pois a mina Vazante apresenta uma peculiaridade que é o bombeamento em grande escala (6.000-14.000 m³/h), assim considerando o percentual de energia gasto em toda mina, os valores referentes a ventilação não são tão expressivos. Porém, o estudo mostrou a possibilidade de reduzir o consumo em 1% do total utilizado pela unidade.

Foram instalados inversores de frequência em todos os ventiladores principais na mina Vazante. Além disso, uma interface para acesso remoto por meio do sistema de despacho foi criada para que o usuário possa fazer alterações conforme a necessidade da mina.

Dentro dos níveis de VOD citados no tópico 3.8, o sistema possui até o nível 3 que é de eventos programáveis. É possível a alteração da velocidade dos ventiladores manualmente nos inversores de frequência ou através da sala de controle despacho. Também podem ser programadas reduções autônomas, de acordo com o horário de entrada e saída na mina, período de detonação e aeração. Além dos benefícios da VOD, a plataforma instalada permite a visualização das condições do sistema, acionamento de ventiladores e corrente dos equipamentos. A interface utilizada é a PlantPAX®, um sistema da RockWell para a

interação de sistemas industriais. A Figura 13 mostra qual é a interface visualizada pelo operador do despacho durante o turno.

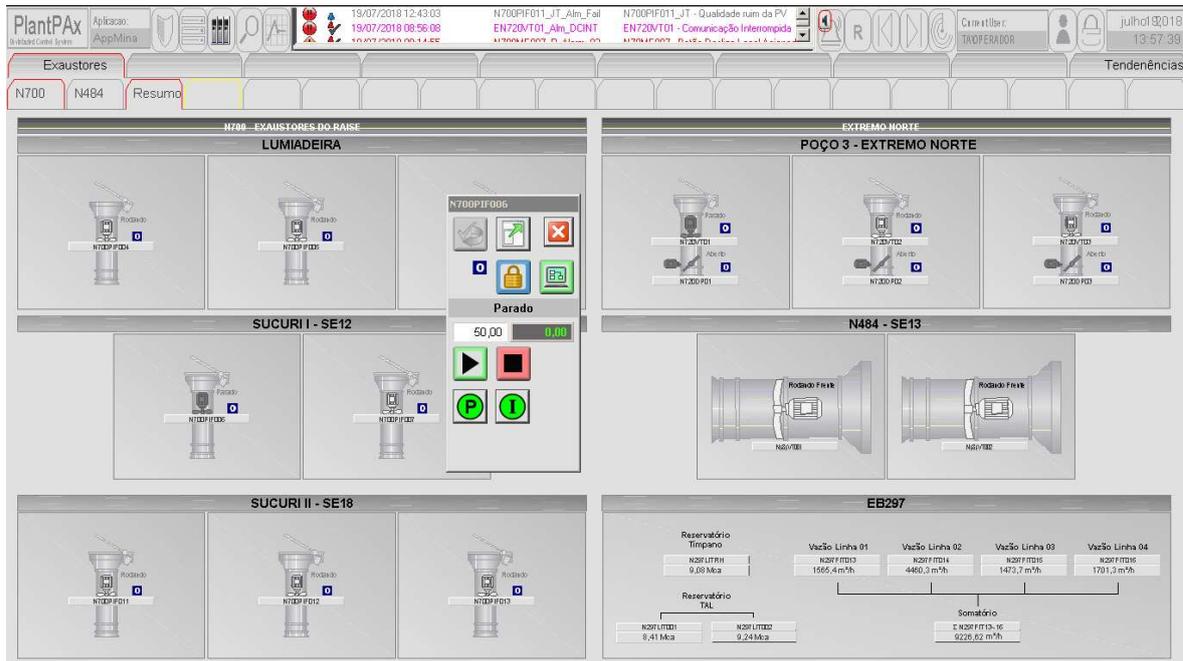


Figura 13: Tela de status dos ventiladores.

No mercado existem outras opções de interfaces, as mais populares são o Simsmart - SmartEXEC®, ABB - Smart Ventilation® e Bestech – NRG1-ECO®. Essas alternativas são dedicadas somente ao VOD, por isso possuem funções já formuladas para os módulos existentes do sistema, diferentemente do plante PlantPax® que é uma plataforma adaptada a ventilação da mina Vazante.

Todos os dados coletados pelo CLPs instalados nos inversores são armazenados na plataforma PIMS. Valores como a potência consumida, corrente e rotação dos ventiladores podem ser visualizados em tempo. A interface do sistema permite a visualização por meio de gráficos como mostrado na Figura 14 ou através de planilhas do Excel com os valores amostrados.

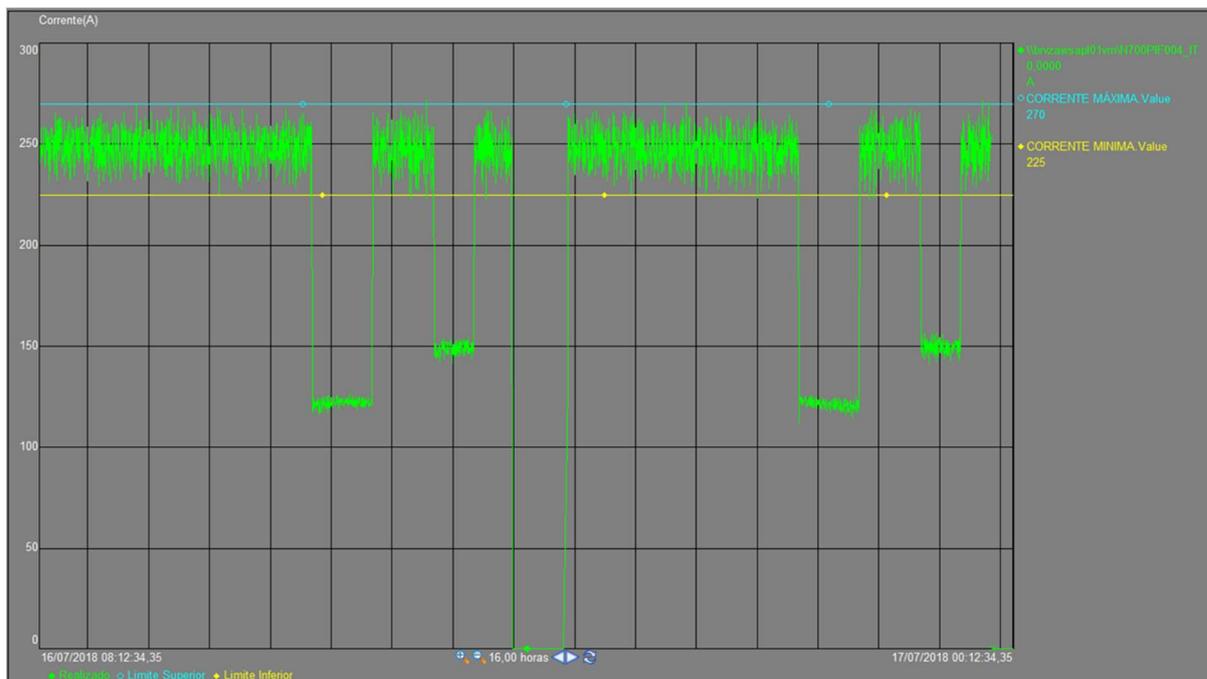


Figura 14: Gráfico de variáveis do ventilador na plataforma PIMS.

De forma a atender às necessidades das operações na mina e manter as condições de saúde ocupacional no subsolo, foram estabelecidos horários para redução da potência dos exaustores. A mina Vazante, no período estudado, funcionava em três turnos de 8 horas, havendo detonação em todos. Portanto, no final de cada turno somente os operários responsáveis pelo desmonte se encontram dentro da mina, dessa forma, a quantidade de ar requerida nesse momento é a menor durante o dia. O intervalo de tempo entre a abertura da mina pós detonação e a chegada dos trabalhadores até a frente de serviço foi outra oportunidade utilizada para redução de consumo. A Figura 15 mostra um exemplo de configuração do sistema de Schedule.

1º Turno				VELOCIDADE AERAÇÃO	
Aeração	22:00	até	22:43		100%
1º Evento (Deslocamento)	22:40	até	23:20		90%
Mina em Operação	23:25	até	05:00		100%
2º Evento (Deslocamento)	05:00	até	05:40		55%
Detonação	05:40	até	06:00		100%
2º Turno					
Aeração	06:00	até	06:43		
1º Evento (Deslocamento)	06:40	até	07:20		
Mina em Operação	07:25	até	13:00		
2º Evento (Deslocamento)	13:00	até	13:40		
Detonação	13:40	até	14:00		
3º Turno					
Aeração	14:00	até	14:43		
1º Evento (Deslocamento)	14:40	até	15:20		
Mina em Operação	15:25	até	21:00		
2º Evento (Deslocamento)	21:00	até	21:40		
Detonação	21:40	até	22:00		

Tela - Escavtores

Figura 15: Tela de configuração dos horários de redução de velocidade dos ventiladores.

5. METODOLOGIA

Com o intuito de mensurar a economia energética obtida pelo sistema de VOD, foram retirados todos os dados de potência consumida no mês de Julho de 2018 dos ventiladores do Sucuri I e II, e do Lumiadeira I. Os ventiladores do Lumiadeira II não estavam com o sistema de VOD instalado nesse período. Os CLPs instalados nos inversores armazenam esses dados por meio de amostragens a cada 10 segundos ou para variações maiores que 1%. O banco de dados fica armazenado na plataforma PIMS e é facilmente exportado para o Excel. Mais de 100 mil dados, para cada ventilador, foram coletados e tratados a fim de estabelecer o consumo de cada equipamento. O tratamento desses dados foi feito pela plataforma Power BI a partir das planilhas de Excel para facilitar o manejo do número enorme de informações. Dessa forma, foi possível estabelecer o consumo de energia em cada hora do dia e compará-lo com o a potência requerida para o sistema rodar com sua capacidade total. Ao longo desse mês o schedule ativo nos ventiladores se manteve constante, facilitando a analogia entre rotação dos ventiladores e potência consumida.

A escolha dos horários para redução da velocidade dos ventiladores foi feita considerando os intervalos entre as trocas de turno. A escala de turnos da Mina Vazante é composta por 3 turnos de 8 horas, sendo que os trabalhadores ficam 6 horas no subsolo por turno. Uma hora antes do horário da detonação, a maior parte da frota de equipamentos não se encontra dentro da mina, dessa forma, foi considerada 55% da potência total do sistema para atender à necessidade dos trabalhadores que se mantinham após esse horário. Portanto, dentro do dimensionamento por frota mostrado no tópico 4.2, apenas metade dos equipamentos foram considerados. Além disso, o segundo horário considerado foi o momento de chegada até a mina. De acordo com o tempo de ciclo de 40 minutos, o intervalo de entrada teve rotação fixada em 70%. A Figura 16 mostra quais horários e potência foram estabelecidos durante o mês Julho 2018. As vazões e potências da figura abaixo foram calculadas a partir das Leis do Ventilador.

Mina Vazante				1º turno			2º turno			3º Turno		Duração	Total de horas	Consumo KW	
RPM (%)	Potência (KW)	Vazão (m³/s)	Período	Início	Fim	Duração	Início	Fim	Duração	Início	Fim				
100	1335	400	Aeração	22:00	22:40	0:40	6:00	6:40	0:40	14:00	14:40	0:40	2,00	2670,00	
70	459	280	2º Evento	22:40	23:20	0:40	6:40	7:20	0:40	14:40	15:20	0:40	2,00	918,00	
100	1335	400	Mina em operação	23:20	4:40	5:20	7:20	12:40	5:20	15:20	20:40	5:20	16,00	21360,00	
55	219	220	2º Evento	4:40	5:40	1:00	12:40	13:40	1:00	20:40	21:40	1:00	3,00	657,00	
100	1335	300	Detonação	5:40	6:00	0:20	13:40	14:00	0:20	21:40	22:00	0:20	1,00	1335,00	
Comentário			Total									Total	8:00	24	26940
			Consumo a 100% RPM												32040
															5100
															15,92

Figura 16: Planilha de Schedule e estimativa das potências.

Dessa forma temos pela Equação 3 que:

$$Pot_2 = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^5 \frac{w_2}{w_1} Pot_1$$

Como nessa relação temos a mesma densidade do ar e diâmetro do ventilador

$$Pot_2 = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 Pot_1$$

E o mesmo vale para a Equação 1 que corresponde a vazão:

$$Q_2 = \frac{n_2}{n_1} Q_1$$

Na determinação da redução do gasto energético foi utilizada a média do consumo para 100% da capacidade total do sistema ao longo do mês e comparado com o gasto real.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A variação da frequência dos ventiladores de acordo com a metodologia descrita no item 5 foi executada por todos os ventiladores da Mina Vazante durante todo mês de Julho. As Figuras 17, 18 e 19 mostram a média do consumo acumulado para cada horário do dia durante os 31 dias avaliados para um ventilador de cada poço. Os demais resultados encontram-se no Apêndice I.

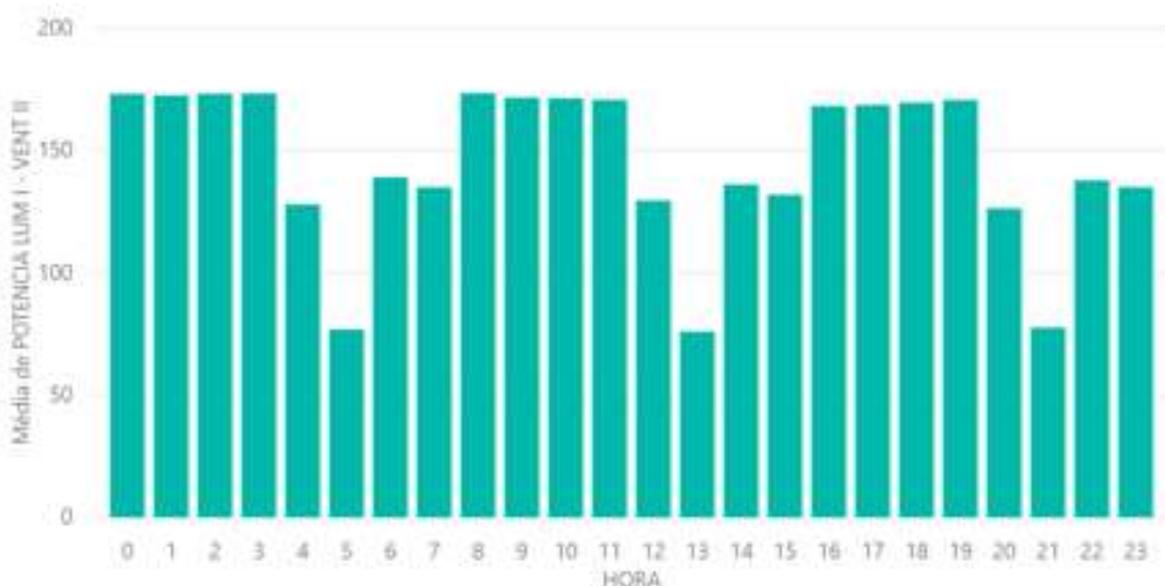


Figura 17: Gráfico da média de consumo energético em kWh ao longo das 24 horas do dia dos ventiladores do Lumiadeira I durante o mês julho de 2018.

Como os resultados apresentados correspondem ao período de 1 h, a correspondência em energia consumida é quase imediata.



Figura 18: Gráfico da média de consumo energético em kWh ao longo das 24 horas do dia dos ventiladores do Sucuri I durante o mês julho de 2018.



Figura 19: Gráfico da média de consumo energético em kWh ao longo das 24 horas do dia dos ventiladores do Sucuri II durante o mês julho de 2018.

Como previsto, nos horários preestabelecidos o consumo energético foi consideravelmente menor. Seguindo as proporções de potência e tempo estabelecidas em cada uma delas, nas horas do dia 4, 12 e 20, os sistemas passaram por uma redução de 45% da rotação durante 20 minutos se tornando um valor intermediário no gráfico. A maior potência ocorreu durante o período que apenas os responsáveis pela detonação estão na mina, contando com 55% de velocidade durante 40 minutos. As duas horas subsequentes ao pico mínimo rodaram com 70% da velocidade total durante 20 minutos. Portanto, o sistema respondeu bem à programação em todos dias do mês em questão.

A respeito da expectativa da comparação do consumo (com e sem os inversores de frequência) está representada na Figura 20, mostrando o total acumulado em ambas as situações, representado por médias aritméticas dos períodos analisados

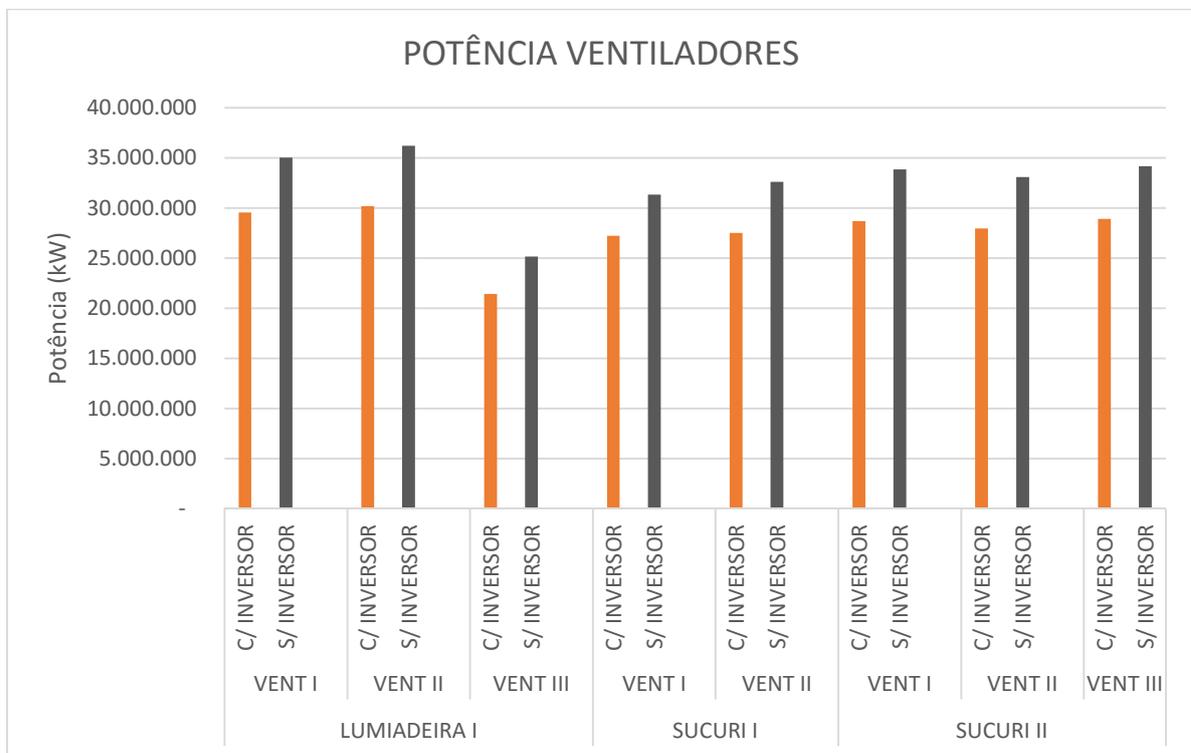


Figura 20: Gráfico comparativo de potência com e sem inversores de frequência.

A potência mostrada na Figura 20 está relacionado com o número de medições feitas pelo CLP, dessa forma não representam o consumo em kWh, porém mostra de forma clara a diferença entre as proporções de um sistema atuando com a variação de frequência e o sistema atuado na sua capacidade total.

Com base nos resultados mostrados na Figura 20 é possível determinar qual a redução do consumo de energia proporcionado pela VOD instalado na mina Vazante, através da equação abaixo:

$$\text{Redução da potência (\%)} = \frac{\text{Potência com a instalação do inversor de frequência}}{\text{Potência sem a instalação do inversor de frequência}} \times 100$$

Foi calculada a redução da potência para cada ventilador analisado e a média encontrada foi de 15,29%. A Figura 21 mostra a redução obtida por ventilador e a redução média.

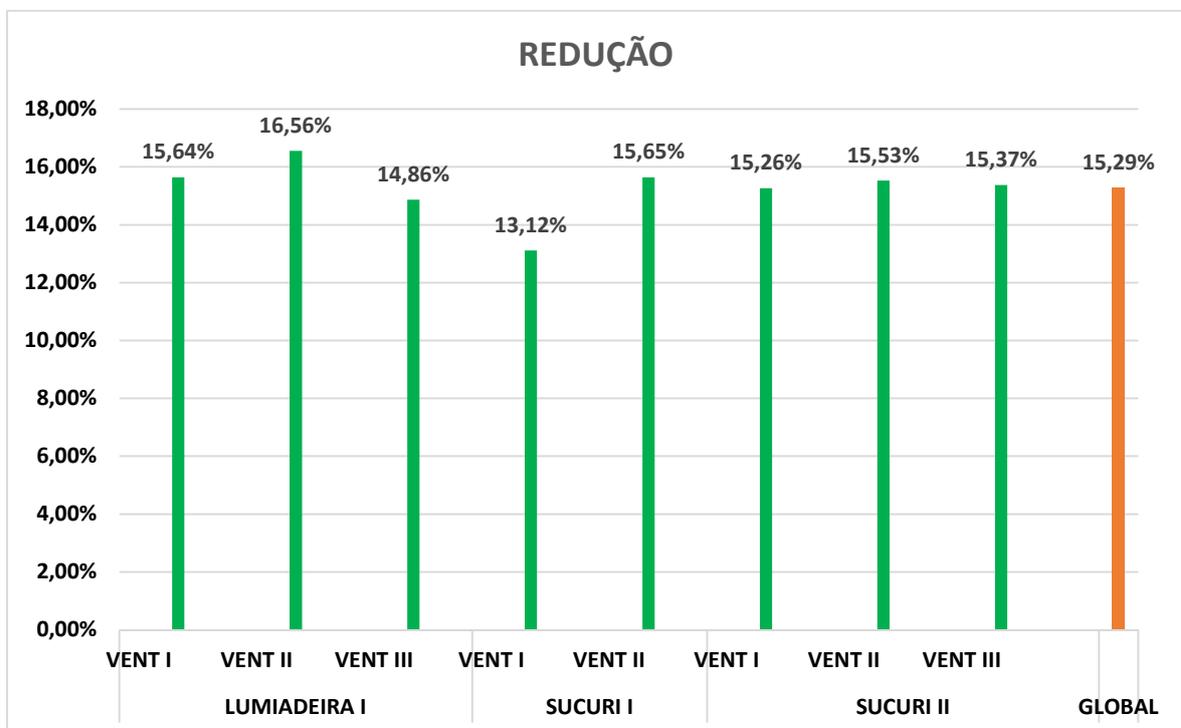


Figura 21: Redução do consumo com a VOD dos Ventiladores Primários.

O resultado encontrado foi similar ao calculado, mostrando uma variação de 0,6% em relação ao esperado. Como o sistema de Ventilação Sob Demanda depende de uma infraestrutura física com cabos de rede conectando todo o sistema, em alguns momentos houve perda de comunicação e o sistema os registrou como erro. Fator que pode ter interferido nos resultados encontrados. Tomando-se o valor médio da tarifa no período de

R\$0,24 por kWh, pode-se estimar a economia de energia em valores monetários. Estima-se da ordem de R\$ 34 mil/mês.

No estudo realizado por Costa (2017), para a Mina Ipueira- Ferbasa, o percentual economizado chegou a 26%, entretanto foi considerada a VOD para os ventiladores secundários e sensores de medição de gás CO contribuíram para o seu funcionamento. Outro fator que influenciou na diferença dos resultados foi o método de determinar a vazão para os momentos de economia, uma vez que foi considerada a operação da mina em duas situações distintas, possibilitando uma redução maior e duradoura.

No relatório da empresa Howden (2016) para uma mina com a mesma produção de Vazante, que utiliza o método de lavra *Long Hole Longitudinal Retreat*, a redução de energia encontrada chegou a 40%, entretanto a quantidade de ar fresco dimensionada é de 800 m³/s. Para outra mina com produção de 3.400 toneladas por dia, a redução foi de 34%, para uma vazão de aproximadamente 640 m³/s. Porém, em nenhum dos casos foi explicado qual o método de alteração na frequência.

Segundo Acuña (2017) para a mina de Totten, no Canadá o consumo energético reduziu em 20% com a utilização do VOD no nível de controle manual ou por usuário. Mostrando-se próximo ao valor encontrado pelo estudo. A Figura 22 representa um gráfico de barras comparando o percentual de redução encontrado em outros trabalhos.

Ao contrário de minas como Resolution (EUA), Cuiabá e Taquari-Vassouras (Brasil), dentre outras, a Mina vazante não necessita de sistema de refrigeração para seu funcionamento.

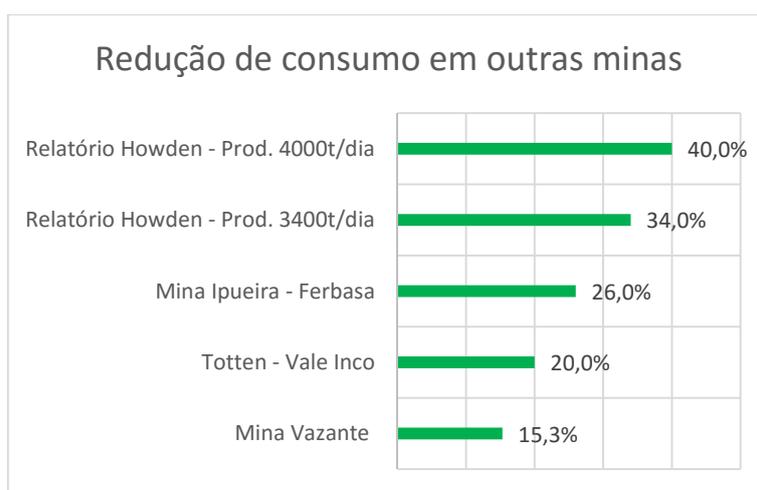


Figura 22: Gráfico comparativo das reduções de consumo energético por meio do VOD.

7. CONCLUSÕES

Este trabalho descreveu como funciona um sistema de ventilação em uma mineração subterrânea, a legislação que o rege, com destaque pra os parâmetros de dimensionamento de ar fresco e limites de tolerância para os gases tóxicos mais comuns em subsolo. Além disso, o conceito de ventilação sob demanda foi descrito, juntamente com seus níveis e sua aplicabilidade.

A Mina Vazante foi apresentada, destacando suas características e seu sistema de ventilação. Os parâmetros utilizados para determinar a quantidade de ar exigida pela NR 22.24 para o empreendimento também foram mostrados. Do mesmo modo, os locais de entrada e saída do ar foram pontuados juntamente com os ventiladores utilizados no sistema de exaustão.

O projeto de ventilação sob demanda em operação foi explicado, explicitando que apenas os ventiladores principais contaram com a instalação de inversores de frequência e foram automatizados ao ponto de serem programados por uma sala de controle. Ademais, a oportunidade encontrada de redução da rotação dos ventiladores foi descrita.

A partir dele, em conjunto com a interface PIMS e o programa Power Bi foi possível estabelecer o consumo energético ao longo do dia, programado pelo *schedule*, que atingiu 15,29% de economia global de energia nos ventiladores principais. O resultado é conclusivo se comparado a outras minas que utilizaram de sistemas com o mesmo grau de complexidade.

Durante o estudo dos níveis de VOD, percebeu-se uma gama de sistemas muito mais elaborados capazes de potencializar os ganhos obtidos. A metodologia aplicada tem horários de redução restritos, portanto somente uma parte dos equipamentos em momentos do dia predeterminados utilizaram da ventilação sob demanda. Esse projeto está em fase de implementação, sujeito a melhorias de acordo com as oportunidades encontradas. Vale lembrar que medições em campo foram realizadas a fim de validar as alterações perante as condições legais.

Entretanto, a instrumentação das frentes de serviço com medidores de vazão e dos gases presentes deve ser vista com extrema importância para garantir o funcionamento adequado

do sistema e permitir que as alterações de frequência dos ventiladores durante o decorrer do turno sejam possíveis.

A análise de viabilidade econômica da implementação do sistema de VOD para os ventiladores auxiliares também é um ponto a ser analisado, visto que em estudos feitos em outras minas, muitos deles estão funcionando em locais sem a presença de pessoas ou equipamentos. Para tal, é necessário a instalação de mais reguladores de vazão nas chaminés de ventilação e nos acessos aos níveis, para garantir o direcionamento adequado do ar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACUÑA, EI & ALLEN, C. **Ventilation control system implementation and energy consumption reduction at Totten Mine with Level 4 Tagging and future plans**, in M Hudyma & Y Potvin (eds), Proceedings of the First International Conference on Underground Mining Technology, Australian Centre for Geomechanics, Perth, p. 89-95, 2017.

ACUÑA, EI & FELIÚ, A. **Considering ventilation on demand for the developments of the New Level Mine Project, El Teniente**, in M Hudyma & Y Potvin (eds), Proceedings of the Seventh International Conference on Deep and High Stress Mining, Australian Centre for Geomechanics, Perth, p. 813-821, 2014.

ANDRADE FILHO, H. R. **Aumento da recuperação de lavra na Mineração Caraíba S/A**. Jaguarari, BA. Revista Eletrônica Brasil MiningSite. Anexos. Artigos. 2008.

BRAKE, D. J. & NIXON, T. **Correctly estimating primary airflow requirements for underground metalliferous mines**. Launceston: Tenth Underground Operator's Conference, 2008.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego (MTE). **NR 15 – Atividades e Operações Insalubres – Anexo nº 11: Agentes químicos cuja insalubridade é caracterizada por limite de tolerância e inspeção no local de trabalho**. Brasília, DF: 1983. Disponível em: <<http://sislex.previdencia.gov.br/paginas/05/mtb/15.htm>>. Acesso em: 15/08/2018.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego (MTE). **NR 22 – Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração**. Brasília, DF: 1999. Disponível em: <<http://trabalho.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR22/NR22.pdf>>. Acesso em: 15/08/2018.

CHARBEL, P. A. **Gerenciamento de Risco Aplicado à Diluição de Minério**. Tese de Doutorado em Geotecnia, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília. 406p. 2015.

COSTA, J. C. A. **Estudos para implantação de um modelo de ventilação sob demanda no complexo mineiro de Ipueira – Ferbasa, município de Andorinha – Bahia**. 111 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

DIAS, P. H. A. et al. **Metalogenia das províncias minerais do Brasil: distrito zincífero de Vazante, MG**. Brasília: CPRM, 2015. 59 p., il. (Informe de recursos minerais. Série províncias minerais do Brasil, 05).

DICKS, F. & CLAUSEN, E. **Ventilation on Demand**. Mining Report 153, Alemanha. No. 4, p. 334-341, 2017.

DNPM. NRM 06 – Ventilação, 2001. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/aceso-a-informacao/legislacao/portarias-do-diretor-geral-do-dnpm/portarias-do-diretor-geral/portaria-no-036-em-16-01-2015-do-diretor-geral-do-dnpm>>. Acesso em: 15/08/2018.

HARDCASTLE, S. & KOCSIS, C. **The ventilation challenge**. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum: CIM, Canada. V. 97, No. 1080, p. 51-57, 2004.

HARTMAN, H. L. et al. **Mine Ventilation and Air Conditioning**. John Wiley & Sons, Inc. 3° ed. 1997.

HOWDEN. **SmartEXEC™ Ventilation-on-Demand**. Disponível em: <[https://www.howden.com/Brochures/Howden%20Ventilation%20on%20Demand%20\(VOD\)%20Case%20Study.pdf?fbclid=IwAR2UVQEqZbbViH3X3TuWFA7SJd9HRarDsk86G6WFNPKAocRdpVT8jp9KLk](https://www.howden.com/Brochures/Howden%20Ventilation%20on%20Demand%20(VOD)%20Case%20Study.pdf?fbclid=IwAR2UVQEqZbbViH3X3TuWFA7SJd9HRarDsk86G6WFNPKAocRdpVT8jp9KLk)>. Acesso em: 12 nov. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **População no último censo - 2010**. Vazante: 2018.

KASHNIKOV, A. Automatic mine ventilation control system. Disponível em: <<https://www.slideshare.net/AlekseyKashnikov/automatic-mine-ventilation-control-system>>. Acesso em: 17/11/2018

MACHADO, H. G. **Gestão de riscos em minas subterrâneas: avaliação da ventilação em minas profundas**. 209 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2011.

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

OLIVEIRA, J. B. et al. **Aplicação de soft-start e conversores de frequência no acionamento de motores assíncronos**. In: Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia – SEGeT.

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

PINTO, P. C. et al. **Construção de um modelo computacional para o circuito de ventilação da Mina Esperança**. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto. V. 56, No. 4, p. 242-248, 2003.

Silva, J. M. 2018. Lavra por corte e enchimento. Lavra Subterrânea. DEMIN/EM/UFOP.

SOUZA, S. M. **Desenvolvimento de um sistema PIMS com comunicação OPC e acesso por Navegador Web**. 67 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Formiga, MG, 2014.

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

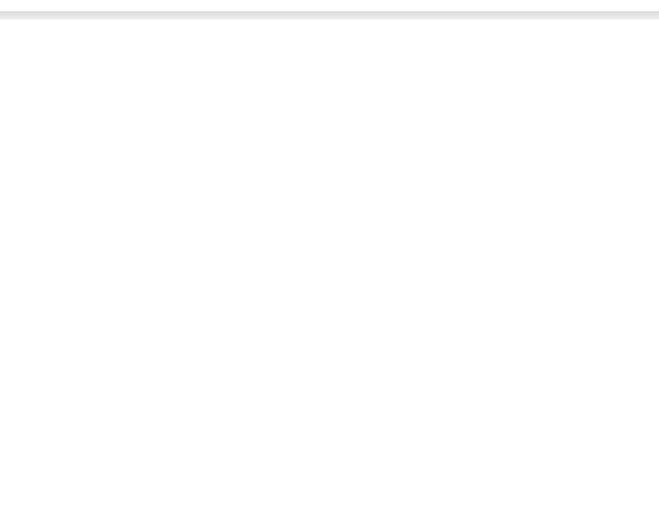
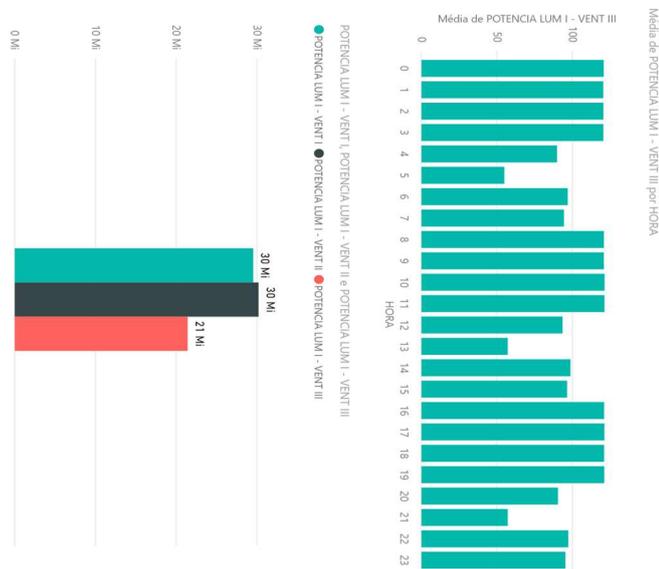
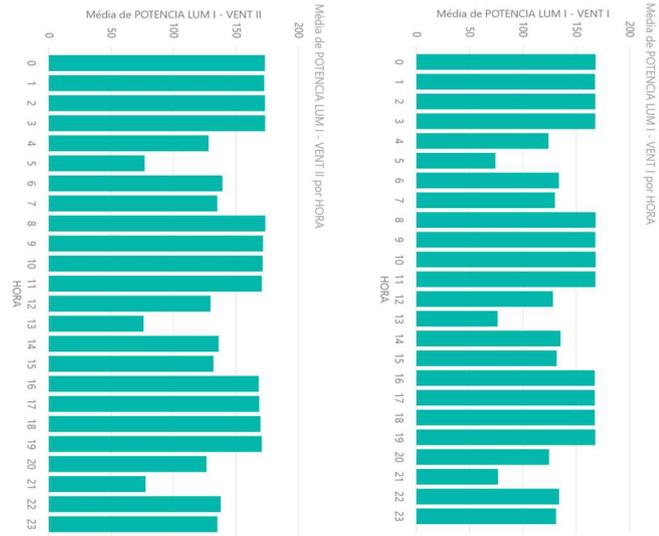
APÊNDICE

APÊNDICE I – Gráficos de potência de todos os ventiladores por hora.

Média de consumo dos ventiladores por hora – Sucuri II.



Média de consumo dos ventiladores por hora – Lumiadeira I.



Média de consumo dos ventiladores por hora – Sucuri I.



Certifico que o aluno Felipe Casagrande Pereira, autor do trabalho de conclusão de curso intitulado “Estudo da economia energética com a implementação do sistema de ventilação sob demanda na Mina Vazante”, efetuou as correções sugeridas pela banca examinadora e que estou de acordo com a versão final do trabalho.

Em 11/12/2018

A handwritten signature in purple ink, reading "jm silva", is positioned above a horizontal line.

Prof. Dr. José Margarida da Silva

Orientador