



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA DE PROCESSOS**

**TESE DE DOUTORADO**

**ESTUDOS PARA IMPLANTAÇÃO DE UM MODELO DE**  
**VENTILAÇÃO SOB DEMANDA NO COMPLEXO MINEIRO DE**  
**IPUEIRA – FERBASA, MUNICÍPIO DE ANDORINHA - BAHIA**

**JOSÉ CÉSAR DE ALBUQUERQUE COSTA**

Campina Grande – PB, fevereiro de 2017

**JOSÉ CÉSAR DE ALBUQUERQUE COSTA**

**ESTUDOS PARA IMPLANTAÇÃO DE UM MODELO DE  
VENTILAÇÃO SOB DEMANDA NO COMPLEXO MINEIRO DE  
IPUEIRA – FERBASA, MUNICÍPIO DE ANDORINHA - BAHIA**

Tese de Doutorado submetida à Coordenação do Curso de Doutorado em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Processos.

Orientador: **Prof. Dr. Marcelo Bezerra Grilo**

Campina Grande – PB, fevereiro de 2017

**ESTUDOS PARA IMPLANTAÇÃO DE UM MODELO DE  
VENTILAÇÃO SOB DEMANDA NO COMPLEXO MINEIRO DE  
IPUEIRA – FERBASA, MINICÍPIO DE ANDORINHA - BAHIA**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos

Tese apresentada no dia 24/02/2017

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. Marcelo Bezerra Grilo - UAEM/PPGEP/CCT/UFCG**

Orientador

---

**Prof. Dr. Antônio Gilson Barbosa de Lima - UAEM/PPGEP/CCT/UFCG**

Examinador Interno

---

**Prof. Dr. Eduardo Jorge Lira Bonates - UAMG/CTRN/UFCG**

Examinador Externo

---

**Prof. Dr. Aarão de Andrade Lima – CONSULTOR**

Examinador Externo

---

**Dr. Francisco Wilson Hollanda Vidal – CETEM/MCTI**

Examinador Externo

**À minha esposa Maria Amélia (in memoriam), aos meus filhos, José César, Maria Carolina, João Bosco e às minhas netas, Marina e Isabela, pelo sentido que dão à minha existência, dedico este trabalho.**

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Prof. Marcelo Bezerra Grilo, pelo incentivo, paciência, empenho e dedicação, meu muito obrigado.

Ao meu orientador de mestrado e amigo, Prof. Aarão de Andrade Lima, por todo o conhecimento transmitido ao longo de toda nossa vida acadêmica na UFCG, onde estivemos juntos por 35 anos, meu muito obrigado.

Ao também amigo e colega de docência na UAMG/UFCG, Prof. Eduardo Jorge Lira Bonates, pelas discussões na fase da elaboração da tese e experiência transmitida, meu muito obrigado.

Quero agradecer ainda ao Prof. Antônio Gilson Barbosa de Lima, pela dedicação e empenho como professor e coordenador do programa de pós-graduação, como também pela valiosa contribuição com as correções por ocasião da Qualificação da Pesquisa.

Agradeço ao Dr. Francisco Wilson Hollanda Vidal, pela aceitação do convite para participação na banca por ocasião da defesa de tese.

Ao corpo técnico da FERBASA, especialmente aos Engenheiros Wanderlei Lins, Homero Sarmento e Wellington Alcântara, pela acolhida e disponibilização das instalações da mina Ipueira, meu muito obrigado.

Agradeço de modo muito especial, ao Engenheiro Gleyser Átilla Ribeiro que, ainda como estagiário da UFCG na FERBASA, na fase inicial da pesquisa, teve participação imprescindível, tanto na coleta dos dados como na execução de testes e simulações.

Agradeço aos meus filhos, noras e genro, pelo apoio mais direto, particularmente a Maria Carolina, pela prestimosa ajuda na formatação do trabalho escrito, e a todos os outros familiares e amigos, entre eles Roberto Leite de Aguiar, pelo incentivo e pela torcida.

Acima de tudo, agradeço ao Deus Criador, por me permitir expressar estes, e tantos outros agradecimentos.

## **RESUMO**

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma pesquisa para a implantação de um modelo de ventilação sob demanda em uma mina subterrânea de grande porte. Trata-se da mina Ipueira, pertencente ao Grupo Ferbasa, localizada no Estado da Bahia, Região Nordeste do Brasil. O processo de ventilação sob demanda (VOD) é o resultado de estudos recentes, que tiveram um maior impulso na última década, e que consiste em variar o suprimento de ar nas diversas áreas da mina de acordo com as necessidades exigidas em cada setor em um dado momento. As quantidades de ar requeridas sofrem modificações de acordo com as alterações dos diversos fatores (concentração de gases, temperatura, poeira, etc.) que dependem, por sua vez, da operação executada, do número de pessoas envolvidas e do tipo e quantidade de equipamentos a diesel solicitados. Os sistemas de ventilação tradicionais tendem a operar com sua capacidade máxima, necessária para manter o suprimento de ar requerido, que por questões de segurança, normalmente é calculado com base em um cenário o mais pessimista possível. Por esse motivo, apresentam forte tendência para um maior consumo de energia em relação aos sistemas de ventilação sob demanda. Isso também justifica o interesse crescente pelo tema e o conseqüente aumento do número de estudos e aplicações do modelo em minas do mundo inteiro. Pela constatação de que esses estudos e suas aplicações são pouco difundidos no Brasil, a presente pesquisa se propõe a contribuir para uma mudança desse quadro. A metodologia, proposta pela pesquisa, tem por base a elaboração de diagnóstico completo do sistema de ventilação existente na mina Ipueira, principalmente no que se refere ao seu consumo de energia. Esse diagnóstico torna-se necessário, tanto para a adoção de medidas cabíveis, como para se estabelecer comparações entre os resultados anteriores e posteriores à implantação do modelo. As simulações realizadas, além de todos os levantamentos e testes necessários, apontam para um resultado bastante otimista no que se refere à economia obtida com a redução do consumo energético pelo sistema de ventilação. A economia mensal, de todo o sistema de ventilação da mina Ipueira, após a implantação do modelo de ventilação sob demanda, ficou prevista em torno de 26%. Esse resultado pode atingir contornos ainda mais significativos com a adoção de outras medidas de aperfeiçoamento do sistema, conforme indicado no corpo da presente tese.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ventilação sob Demanda. Mina Ipueira. Sistema de Ventilação.  
Consumo de Energia.

## **ABSTRACT**

This work presents the development of a research for the implementation of a model of ventilation on demand (VOD) in a large underground mine. This is the Ipueira mine belonging to the Ferbasa Group, located in the State of Bahia, Northeastern Brazil. The ventilation on demand (VOD) process is the result of recent studies, which have been boosted in the last decade, and it consists in varying the air supply in the various areas of the mine according to the needs of each sector at a given time. The amounts of air required are modified according to the changes in the various factors (gas concentration, temperature, dust, etc.) which in turn depend on the operation performed, the number of personnel involved and the type and quantity of diesel equipment in operation. Traditional ventilation systems tend to operate at their maximum capacity, necessary to maintain the required air supply, which for safety reasons is usually calculated based on the most pessimistic scenario possible. For this reason, they have a strong tendency towards higher energy consumption compared to ventilation on demand systems. This also justifies the growing interest in the theme and the consequent increase in the number of studies and applications of the model in mines around the world. Based on the fact that these studies and their applications are not widespread in Brazil, the present research proposes to contribute to a change in this situation. The methodology, proposed by the research, is based on the elaboration of a complete diagnosis of the existing ventilation system at the Ipueira mine, mainly in terms of its energy consumption. This diagnosis is necessary, both for the adoption of appropriate measures, and to establish comparisons between the results before and after the implantation of the VOD model. The simulations carried out, in addition to all the necessary surveys and tests, point to a very optimistic result regarding the economy obtained by reducing the energy consumption by the ventilation system. The monthly savings of the entire ventilation system at the Ipueira mine after the implementation of the ventilation on demand model was estimated at around 26%. This result can reach even more significant levels with the adoption of other system improvement measures, as indicated in the body of the present thesis.

**KEYWORDS:** Ventilation on Demand. Mine Ipueira. Ventilation system.  
Energy consumption.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Localização da Mina Ipueira.....	5
Figura 1.2	(a) Areia de Cromita, (b) Hard Lump e (c) Concentrado de Cromita.....	6
Figura 2.1	Sistema básico de ventilação de mina: D – portas; R – reguladores; 1, 2, 3- frentes de serviço.....	13
Figura 2.2	Ventilação auxiliar soprante.....	14
Figura 2.3	Ventilação auxiliar por exaustão.....	14
Figura 2.4	Ventilação auxiliar por exaustão com reforço soprante.....	15
Figura 2.5	Ventilação auxiliar soprante com reforço por exaustão.....	15
Figura 2.6	Curva característica de galeria ou mina.....	24
Figura 2.7	Curvas características de ventilador.....	27
Figura 2.8	Elementos básicos de um ventilador centrífugo.....	28
Figura 2.9	Elementos básicos de um ventilador axial.....	29
Figura 2.10	Determinação das condições de operação do ventilador.....	31
Figura 2.11	Pico da corrente de partida de um motor elétrico.....	31
Figura 2.12	Sensor de Monóxido de Carbono.....	33
Figura 2.13	Painel de automação contendo o Controle Lógico Programável (CLP).....	34
Figura 2.14	Tela do Ventsim com caixa de diálogo para entrada de dados.....	35
Figura 2.15	Circuito completo de ventilação da mina Ipueira mostrado no Ventsim.....	35
Figura 4.1	Minas e outros empreendimentos do grupo FERBASA.....	46
Figura 4.2	Vista completa dos seis painéis da mina Ipueira.....	47
Figura 4.3	Rampas e níveis da mina Ipueira.....	48
Figura 4.4	Esboço do método de lavra de abatimento por subníveis, com detalhes dos leques de detonação ou seções de lavra.....	50
Figura 4.5	Croqui esquemático das principais aberturas da mina Ipueira.....	53
Figura 4.6	Ventiladores de exaustão da mina de Ipueira II.....	55
Figura 4.7	Diagrama do comportamento do fluxo na mina Ipueira.....	55
Figura 4.8	Circuito de ventilação principal da mina Ipueira.....	57
Figura 4.9	Ventilador secundário e dutos de ventilação.....	58
Figura 4.10	Croqui do nível 420 Ipueira IV.....	64
Figura 4.11	Localização dos pontos de medição de vazão na mina.....	67
Figura 5.1	Painéis de automação e do ventilador do nível 440 de Ipueira IV.....	74

Figura 5.2	Esquema da automação, por sensores de CO, do nível 440 – Ipueira IV.....	75
Figura 5.3	Distribuição da energia consumida nos horários normal e de ponta.....	77
Figura 5.4	Consumo atual dos sistemas de ventilação.....	77
Figura 5.5	Análise da retirada dos ventiladores principais de Ipueira II.....	78
Figura 5.6	Estimativa da relação do consumo de energia com a automação do sistema de ventilação.....	80
Figura 5.7	Consumo dos ventiladores secundários em relação à condição do sistema - Mês de Agosto/2014.....	84
Figura 5.8	Consumo dos ventiladores secundários em relação à condição do sistema - Mês de Setembro/2014.....	85
Figura 5.9	Consumo dos ventiladores secundários em relação à condição do sistema - Mês de Outubro/2014.....	86

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Composição média percentual do ar seco.....	10
Tabela 4.1	Distribuição e principais características dos ventiladores principais da mina Ipueira.....	56
Tabela 4.2	Distribuição e características dos ventiladores secundários da mina Ipueira.....	60
Tabela 4.3	Quadro de horário dos ventiladores secundários.....	61
Tabela 5.1	Lista da frota da Mina Ipueira e respectivas potências.....	70
Tabela 5.2	Vazão requerida em função dos equipamentos e colaboradores (Horário normal).....	71
Tabela 5.3	Vazão requerida em função dos equipamentos e colaboradores (Horário de ponta).....	72
Tabela 5.4	Vazão requerida x Vazão medida na mina.....	73
Tabela 5.5	Custo específico do ar fornecido pela ventilação secundária.....	76
Tabela 5.6	Comparação entre as vazões obtidas pelo Ventsim e as medidas em campo..	79
Tabela 5.7	Parâmetros do sistema atual da ventilação secundária.....	81
Tabela 5.8	Parâmetros do sistema automatizado da ventilação secundária.....	82
Tabela 5.9	Comparativo entre os sistemas de ventilação secundária.....	83

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Área da seção transversal da galeria ou duto	[m <sup>2</sup> ]
$A_i$	Área do fluxo de ar, normal à sua direção, no ponto $i$	[m <sup>2</sup> ]
$C$	Perímetro da seção transversal da galeria ou duto	[m]
$D$	Diâmetro do duto	[m]
$D_i$	Diâmetro do impulsor	[m]
$F_T$	Pressão total do ventilador	[Pa]
$F_S$	Pressão estática do ventilador	[Pa]
$F_V$	Pressão dinâmica do ventilador	[Pa]
$g$	Aceleração da gravidade	[m/s <sup>2</sup> ]
$H$	Altura do centro de massa do fluxo de ar acima de um nível de referência de energia potencial	[m]
$K$	Fator de fricção	[Ns <sup>2</sup> /m <sup>4</sup> ]
$L$	Comprimento da galeria ou duto	[m]
$L_e$	Comprimento de galeria retilínea equivalente	[m]
$N_p$	Número de pessoas no turno de trabalho em subsolo	[unidade]
$n$	Velocidade de rotação do impulsor	[rpm]
$n_s$	Velocidade específica de um ventilador	[rpm]
$P$	Pressão de uma determinada massa de ar	[Pa]
$P_i$	Pressão de uma determinada massa de ar no ponto $i$	[Pa]
$p$	Perda de pressão do fluxo de ar entre dois pontos	[Pa]
$p_f$	Perda de pressão por fricção	[Pa]
$p_x$	Perda de pressão por choque	[Pa]
$p_v$	Aumento de pressão do fluxo de ar, entre dois pontos, devido a um ventilador	[Pa]
$Q$	Taxa de fluxo de volume ou vazão do ar	[m <sup>3</sup> /s]
$Q_{e,p}$	Vazão total de ar em função do número de equipamentos e pessoas	[m <sup>3</sup> /min]
$Q_i$	Vazão do ar no ponto $i$	[m <sup>3</sup> /s]
$Q_T$	Vazão total de ar em função da tonelagem desmontada	[m <sup>3</sup> /min]

$q_p$	Vazão de ar requerida por pessoa presente em subsolo	[m <sup>3</sup> /min]
$q_w$	Vazão de ar requerida por unidade de potência de motor	[m <sup>3</sup> /min]
$q_t$	Vazão de ar requerida por 1.000 toneladas desmontadas	[m <sup>3</sup> /min]
$R$	Resistência dos trabalhos mineiros à passagem do ar	[Ns <sup>2</sup> /m <sup>8</sup> ]
$R_e$	Número de Reynolds	[adimensional]
$T$	Produção mensal em toneladas desmontadas	[tonelada]
$V$	Velocidade do fluxo de ar	[m/s]
$V_i$	Velocidade do fluxo de ar no ponto $i$ (m/s)	[m/s]
$W$	Potência requerida para o fluxo do ar entre dois pontos	[Watt]
$W_e$	Potência total dos motores dos equipamentos a diesel	[Watt]
$W_M$	Potência mecânica ou potência de entrada do ventilador	[Watt]
$W_S$	Potência estática do ar ou de saída do ventilador	[Watt]
$W_T$	Potência total do ar ou de saída do ventilador	[Watt]
$w$	Densidade do ar	[kg/m <sup>3</sup> ]
$w_i$	Densidade do ar no ponto $i$	[kg/m <sup>3</sup> ]

### Símbolos gregos

$\eta_s$	Eficiência estática do ventilador	[adimensional]
$\eta_T$	Eficiência total do ventilador	[adimensional]
$\theta$	Fator de perda de pressão por choque	[adimensional]
$\mu$	Viscosidade absoluta do fluido	[Pa.s]
$\nu$	Viscosidade cinemática do fluido	[m <sup>2</sup> /s]

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> (Dinâmica de Fluido Computacional)
CLP	Controle Lógico Programável
CPM	<i>Critical Path Method</i> (Método do Caminho Crítico)
DRIVE	Galeria de Lavra
DSM	<i>Demand Side Management</i> (Gestão da Demanda)
EE	<i>Energy Efficiency</i> (Eficiência Energética)
FERBASA	Companhia Ferro Ligas da Bahia
GP	Galeria de Pesquisa
LHD	<i>Load Haul Dump</i> (Carregadeira Rebaixada)
LM	<i>Load Management</i> (Gestão de Carga)
MAP	Programa de Automação de Mineração
MTE	Ministério do Trabalho e Emprego
NIOSH	<i>National Institute for Occupational Safety and Health</i> (Instituto Nacional para Saúde e Segurança Ocupacional)
NR-22	Norma Regulamentadora nº 22
NVP	<i>Natural Ventilation Pressure</i> (Pressão de Ventilação Natural)
PA	Ponto de Apoio
PRL	<i>Pittsburg Research Laboratory</i> (Laboratório de Pesquisa de Pitsburgo)
RC	Rampa de Comunicação
REFLORA	Reflorestadora e Agrícola S/A
ROM	<i>Run of Mine</i> (Material Desmontado Extraído da Mina)
RP	Rampa Principal
TOU	<i>Time of Use</i> (Tempo de Uso)
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
VOD	<i>Ventilation on Demand</i> (Ventilação sob Demanda)

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	2
1 <b>INTRODUÇÃO</b> .....	2
1.1    Motivações para a pesquisa.....	3
1.2    Aspectos do local de aplicação da pesquisa.....	4
1.2.1    Localização e vias de acesso.....	4
1.2.2    Histórico.....	5
1.2.3    Produtos.....	6
1.2.4    Áreas de atuação.....	6
1.2.5    Generalidades do cromo.....	6
1.2.6    Produção e principais usos.....	7
1.3    Objetivos.....	7
1.3.1    Objetivo Geral.....	7
1.3.2    Objetivos Específicos.....	8
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	10
2 <b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS DA VENTILAÇÃO DE MINAS</b> .....	10
2.1    Propriedades do ar.....	10
2.2    Características do ar no interior das minas.....	10
2.3    Objetivos de um sistema de ventilação de mina.....	11
2.4    Fontes de fluxo de ar nas minas.....	12
2.5    Circulação geral do ar nas minas.....	12
2.6    Ventilação auxiliar.....	13
2.7    Fundamentos do fluxo de ar.....	15
2.7.1    A equação de continuidade ou conservação de massa.....	16
2.7.2    A Equação de energia.....	16
2.7.3    Pressões estática, dinâmica e total.....	17
2.7.4    A equação de Bernoulli em ventilação de mina.....	18
2.7.5    Número de Reynolds.....	19
2.8    Resistência à ventilação.....	20
2.8.1    Perda de pressão por fricção.....	20
2.8.2    O fator de fricção.....	21

2.8.3	Determinação da resistência.....	22
2.8.4	Perdas de pressão por choque.....	22
2.8.5	Perda total de pressão.....	23
2.8.6	Potência requerida para o fluxo do ar.....	24
2.9	Ventiladores.....	24
2.9.1	Pressão do ventilador.....	25
2.9.2	Potência e eficiência do ventilador.....	26
2.9.3	Tipos de ventiladores.....	27
2.9.4	Leis do ventilador.....	29
2.9.5	Seleção de ventiladores.....	30
2.9.6	Ponto de operação do sistema de ventilação.....	30
2.10	Painéis elétricos.....	31
2.11	Automação industrial e controle remoto.....	32
2.12	Software de ventilação.....	34
 <b>CAPÍTULO 3.....</b>		<b>37</b>
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	37
 <b>CAPÍTULO 4.....</b>		<b>45</b>
4	METODOLOGIA.....	45
4.1	Aspectos geológicos.....	45
4.2	Layout da mina Ipueira.....	46
4.3	Métodos de lavra adotados na mina Ipueira.....	49
4.3.1	Conceitos básicos sobre diluição na lavra.....	49
4.3.2	Conceito de recuperação.....	50
4.3.3	Método de lavra modificado.....	51
4.4	Tipos de aberturas da mina Ipueira.....	52
4.5	Carregamento e transporte.....	53
4.6	Características gerais do sistema de ventilação.....	53
4.6.1	Ventilação principal.....	54
4.6.2	Ventilação secundária.....	58
4.7	Pesquisa para implantação da automação na ventilação secundária.....	59
4.8	Quantificação das horas de operação dos ventiladores secundários.....	61

4.9	Quantidade de ar fresco requerida pela mina.....	61
4.9.1	Vazão requerida em função dos equipamentos e número de colaboradores.	62
4.9.2	Vazão requerida em função da tonelagem mensal desmontada.....	63
4.10	Controle da vazão nas frentes de serviço com o uso de sensores.....	63
4.11	Mapeamento do sistema de ventilação secundária das minas Ipueira.....	63
4.12	Análise de custos do sistema de ventilação da mina Ipueira.....	65
4.13	Análise da ventilação secundária com o uso do Ventsim.....	65
4.14	Análise da ventilação principal por simulações.....	66
 <b>CAPÍTULO 5.....</b>		<b>69</b>
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	69
5.1	Horas de operação dos ventiladores secundários.....	69
5.2	Determinação da vazão requerida pela mina.....	69
5.2.1	Determinação em função dos equipamentos e número de colaboradores....	69
5.2.2	Determinação em função da tonelagem mensal desmontada.....	72
5.2.3	Vazão requerida adotada.....	72
5.3	Automação do nível 440 de Ipueira IV por meio de sensores.....	73
5.4	Custo do sistema de ventilação da mina Ipueira.....	76
5.5	Análise da ventilação principal (simulações).....	78
5.6	Automação da ventilação secundária.....	80
 <b>CAPÍTULO 6.....</b>		<b>89</b>
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	89
6.1	Conclusões	89
6.2	Sugestões para trabalhos futuros	91
 <b>REFERÊNCIAS.....</b>		<b>92</b>

**CAPÍTULO 1**  
**INTRODUÇÃO**

# **CAPÍTULO 1**

## **1. INTRODUÇÃO**

O sistema de ventilação é um dos mais importantes sistemas funcionais necessários para operações em minas subterrâneas. Ele engloba a conexão de galerias e dutos, juntamente com as fontes de pressão e esquemas de controle que produzem e governam o fluxo de ar ao longo da mina.

A necessidade do controle da quantidade e qualidade do ar aumenta de acordo com o aprofundamento, a expansão e a complexidade da rede subterrânea. Por outro lado, o controle do circuito de ventilação depende do conhecimento: das funções a serem realizadas, dos princípios que regem o comportamento dos gases e dos métodos de planejamento dos projetos de ventilação que obtenham o efeito desejado.

Na última década, em virtude do alto consumo de energia solicitado pelos sistemas de ventilação de mina, que na maioria dos casos ultrapassa 50% de todo o consumo dispensado a todas as atividades realizadas em subsolo, e da escassez de energia no planeta, tem-se experimentando o surgimento e desenvolvimento de diversas pesquisas, no campo de atuação da ventilação de mina subterrânea. Estas pesquisas têm como meta uma significativa redução no consumo de energia, sem negligenciar aspectos da quantidade e qualidade do ar necessário ao melhor desempenho do sistema e ao atendimento às normas de segurança e conforto do trabalhador impostas pelos órgãos reguladores competentes.

Como resultado dessas pesquisas, um sistema de ventilação de mina mais eficiente, conhecido como “Sistema de Ventilação sob Demanda (VOD)”, tem sido proposto e testado recentemente em minas do mundo inteiro.

Considerando que este novo modelo de ventilação não tem tido a devida aplicação em minas subterrâneas brasileiras, a presente pesquisa se propõe a contribuir na aplicação e aperfeiçoamento do processo de ventilação sob demanda em uma mina da região nordeste do Brasil.

## 1.1 Motivações para a pesquisa

A operação de ventilação de minas subterrâneas constitui um tema que desperta grande interesse atualmente. O aprofundamento das minas, e a conscientização crescente com relação à segurança e bem estar do trabalhador, são responsáveis por esse interesse. Por outro lado, a disponibilidade de instrumentos para medição de parâmetros de ventilação confiáveis e de custos reduzidos, conjugada com a crescente disponibilidade e portabilidade de recursos computacionais, em termos de máquinas e programas, justifica a atenção das empresas no sentido de projetarem de forma mais eficiente seus sistemas de ventilação.

As dificuldades de ordem numérica para a análise de redes de ventilação de minas vêm sendo superadas, desde as últimas décadas do século passado, através do desenvolvimento de programas comerciais de fácil uso, e providos de recursos gráficos que facilitam sobremaneira a interpretação dos resultados nas aplicações de ordem prática que ocorrem no dia a dia das minas subterrâneas. A busca do aperfeiçoamento de sistemas de ventilação envolve necessariamente o uso de técnicas numéricas computadorizadas, tendo em vista o grande número de desenhos de projeto alternativos a serem testados. A disseminação destas técnicas suplantaram totalmente os modelos analógicos, ou modelos em escala reduzida, usados no passado. Por outro lado, nota-se que estas modernas facilidades de análise não têm sido plenamente difundidas no setor produtivo, a nível nacional.

Esta constatação ganha contornos ainda maiores quando se trata do surgimento de propostas de novas metodologias para a modernização dos sistemas de ventilação atualmente em uso, como é o caso da ventilação sob demanda. As novas técnicas se propõem a variar o suprimento e distribuição dos fluxos de ar nas diversas áreas da mina de acordo com as necessidades exigidas em cada local e em cada momento. Isto se justifica uma vez que a quantidade e qualidade do ar necessário, nos vários setores da mina, tendem a sofrer modificações de acordo com as alterações dos diversos fatores (concentração de gases, temperatura, poeira, etc.) que sofrem a influência dos diversos tipos de operação executada, do número de pessoas envolvidas e do tipo e quantidade de equipamentos a diesel solicitados.

Merece destaque o fato de que os custos com ventilação de minas, em termos de consumo de energia, investimento em equipamentos e dispositivos de controle de fluxo, crescem de forma acentuada com a extensão e aprofundamento das minas. Outro fator de

crescimento dos custos tem sido o aumento e a complexidade das escavações, quando se torna comum a existência de diversas frentes de lavra em produção simultânea.

Com relação ao aspecto econômico, a implantação de técnicas de ventilação sob demanda exige uma série de investimentos em sensores e equipamentos de automação, além de estudos e testes necessários à otimização do sistema. Contudo, estudos econômicos realizados comprovam a eficácia deste modelo, principalmente ao considerar-se a escassez e consequente elevação dos custos de energia no planeta.

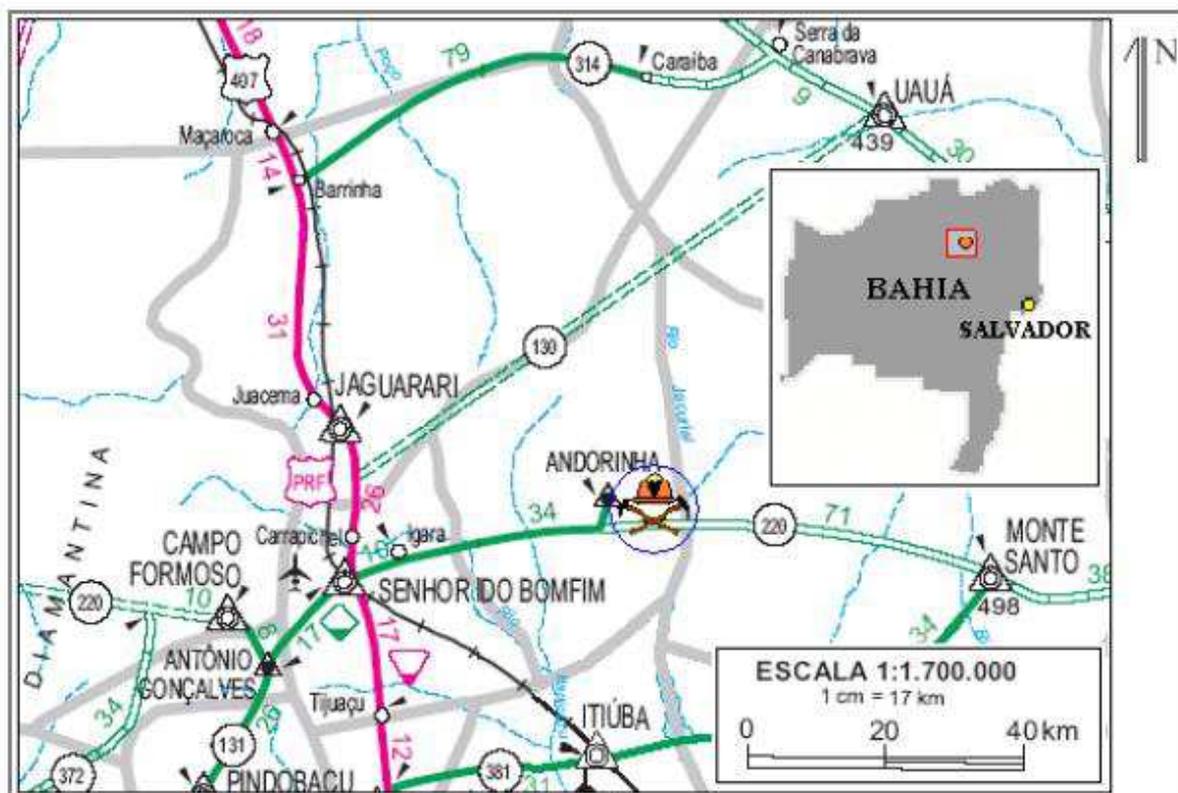
Além destes custos, a ventilação está ligada a aspectos da segurança e saúde dos trabalhadores que atuam no subsolo. Aspectos ligados ao ambiente de trabalho e seus efeitos na produtividade dos operários não devem ser negligenciados. A ventilação constitui o fator principal para controle das condições do ambiente da mina, em termos de diluição de poeira e gases, atenuação de temperatura e umidade excessivas, contribuindo para a manutenção de um ambiente de trabalho com padrões aceitáveis.

## **1.2 Aspectos do local de aplicação da pesquisa**

O campo para aplicação dos diversos tipos de análise a serem realizados pela presente pesquisa a fim de se alcançarem os objetivos propostos é a Mina Ipueira da Companhia Ferro Ligas da Bahia – FERBASA, localizada no município de Andorinha, Estado da Bahia.

### **1.2.1 Localização e vias de acesso**

A mina Ipueira situa-se na porção Norte-Nordeste do Estado da Bahia, distante aproximadamente 1,5 Km da borda leste da Serra de Itiúba, nas imediações da sede do município de Andorinha. Partindo de Salvador, o acesso é realizado pela BR-324, até Feira de Santana (108 Km) e daí, pela BR-264, até Senhor do Bomfim (264 Km). A partir de Senhor do Bomfim segue-se no sentido do município de Andorinha (57 Km), onde está localizada a mina a 11 Km da sede deste município. O município de Andorinha está representado na folha de mesmo nome com latitude de 10°00' a 10°30'S e longitude de 39°30' a 40°00'W. A mina Ipueira tem como coordenadas geográficas 39°45'56'' de longitude oeste e 10°21'51'' de latitude sul. A Figura 1.1 mostra a localização da mina Ipueira.



**Figura 1.1 - Localização da Mina Ipueira.**

### 1.2.2 Histórico

Fundada em 23 de fevereiro de 1961 pelo engenheiro José Gorgosinho de Carvalho Filho, a FERBASA iniciou suas atividades no município de Campo Formoso - BA, no ramo de mineração, com o objetivo de produzir minério de cromo para o abastecimento da indústria nacional.

A descoberta das ocorrências de minério de cromo nas proximidades do Vale do Jacurici, no município de Andorinha, foi resultado de uma intensa campanha de prospecção, relacionada à necessidade do abastecimento da Fábrica de Ferro Ligas do Grupo FERBASA, fundada no início da década de 1960 no município de Pojuca – BA.

A FERBASA está entre as 100 maiores empresas do Brasil e entre as 20 maiores do estado da Bahia, com faturamento em torno de 200 milhões de dólares, exercendo, desde a sua fundação, papel decisivo no desenvolvimento econômico e social nas regiões onde está

instalada, tendo, portanto, uma grande parcela de responsabilidade no crescimento das economias locais e do Estado da Bahia.

### 1.2.3 Produtos

A mineração FERBASA fornece ao mercado consumidor os produtos conhecidos como Hard Lump, Areia de Cromita e o Concentrado de Cromita (Figura 1.2). A granulometria é o parâmetro que caracteriza cada um desses produtos.



Figura 1.2 – (a) Areia de Cromita, (b) Hard Lump e (c) Concentrado de Cromita.

### 1.2.4 Áreas de atuação

A FERBASA atua principalmente na produção de bens minerais, nas áreas de extração de cromita, silício e calcário; e metalurgia com a produção de ferro cromo alto carbono, ferro cromo baixo carbono, ferro silício cromo e ferro silício 75%. Outra área de atuação da FERBASA, realizada por uma subsidiária, a REFLORA – Reflorestadora e Agrícola S/A, é o plantio de reservas de eucalipto para uso nos fornos da companhia.

### 1.2.5 Generalidades do cromo

A cromita é o único mineral-minério utilizado para a obtenção do cromo metálico. Trata-se de um mineral isométrico e hexaocaedral, isento de clivagem, frágil, quebradiço, com fraturas tendendo ao tipo conchoidal, de brilho metálico a submetálico, traço acastanhado escuro, dureza variável de 5,5 a 6,5 e peso específico entre 4,1 a 4,7. Apresenta-se, em amostra de mão ou afloramento, na tonalidade escura com tendência ao preto acinzentada. Ao microscópio, em seção delgada, é opaca, amarelo-escuro ou vermelho-laranja, e em seção polida, sob luz refletida, exibe tom de cinza claro.

## **1.2.6 Produção e principais usos**

Cromita ou minério de cromo são terminologias usadas indistintamente, largamente difundidas e aplicadas em quaisquer dos segmentos envolvidos, seja mineração, industrialização ou comercialização, embora seja mais frequente o emprego da segunda forma, principalmente quando se refere à cotação do mercado consumidor.

A produção beneficiada brasileira de cromita em 2014 atingiu 716.674,87 t, equivalentes a 244.622,46 t de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  contido. A FERBASA, com participação de 70,80% na produção nacional, produziu 507.423,87 t, com 39,0% de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (SUMÁRIO MINERAL – DNPM, 2015).

Na indústria metalúrgica, o minério de cromo é amplamente usado na produção de ligas de ferro-cromo de alto e baixo teor de carbono.

Na indústria química, os produtos derivados de cromo a partir da obtenção do bicromato de sódio têm a sua maior e principal aplicação nas seguintes áreas:

- a) No curtimento de peles, couros etc.;
- b) Na preparação de corantes (pigmentos);
- c) Na preparação de substâncias fixadoras das cores no processo de tingimento;
- d) Na preparação de impressões, estamparias, tintas etc.;
- e) Nos processos químicos industriais, em fotografias, produtos farmacêuticos, na galvanização metálica.

Na indústria de refratários, o cromo participa como um componente fundamental na estrutura de tijolos refratários básicos, indispensáveis na produção do aço, no refinamento de ligas não ferrosas, no fabrico de vidro, no processamento do cimento etc.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo Geral**

Estudar novas técnicas e metodologias de aperfeiçoamento de sistemas de ventilação de minas subterrâneas, aplicando-as na mina Ipueira da FERBASA.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- a) Determinar as quantidades de ar requeridas pela mina conforme metodologia estabelecida pela Norma Regulamentadora N° 22 do MTE;
- b) Comparar os resultados da determinação com os valores de vazão medidos em campo;
- c) Realizar testes para monitoramento da vazão nas frentes de serviço com uso de sensores;
- d) Realizar mapeamento completo do sistema de ventilação secundária para a adoção de medidas de automação e monitoramento;
- e) Elaborar um diagnóstico do consumo de energia do sistema de ventilação existente;
- f) Estimar, por meio de simulações, o consumo de energia do sistema de ventilação após a adoção de medidas de automação e monitoramento;
- g) Comparar o comportamento do sistema de ventilação operando de forma convencional e automatizada;

## **CAPÍTULO 2**

# **FUNDAMENTOS TEÓRICOS DA VENTILAÇÃO DE MINAS**

## CAPÍTULO 2

### 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DA VENTILAÇÃO DE MINAS

#### 2.1 Propriedades do ar

O ar, como é encontrado na natureza, é um fluido constituído por uma mistura de gases (nitrogênio, oxigênio, dióxido de carbono, etc.), vapor de água e vários contaminantes, tais como partículas sólidas em suspensão e outros gases.

O ar seco existe quando, do ar natural, são removidos todo vapor de água e os contaminantes nele contidos. Sua composição é relativamente constante, apesar das pequenas variações em função da localização geográfica e altitude. A composição média percentual do ar seco, em volume e peso, é apresentada na Tabela 2.1 (HARTMAN, 1982).

**Tabela 2.1 - Composição média percentual do ar seco.**

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

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

O ar atmosférico ao percorrer, no interior das minas, as galerias e frentes de trabalho, sofre uma série de alterações químicas e físicas, provocando mudanças na sua composição, com diminuição do conteúdo de oxigênio, geralmente acompanhada do aumento dos conteúdos de anidrido carbônico, nitrogênio e vapor d'água, além de agregar gases tóxicos e explosivos (monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, gás sulfídrico, dióxido de enxofre,

metano e outros) e poeiras diversas. Ocorrem ainda, alterações de temperatura, umidade relativa e peso específico.

Denomina-se de “ar fresco”, o ar da mina, totalmente respirável, que apresenta composição aproximada a do ar atmosférico, e que normalmente apresenta estas características, antes de atravessar as frentes de trabalho. Por outro lado, chama-se “ar viciado”, o ar impróprio para a respiração, também chamado de ar de retorno, por já ter atravessado as frentes de trabalho.

### **2.3 Objetivos de um sistema de ventilação de mina**

A função primária de um sistema de ventilação é o fornecimento de ar quando e onde necessário. Esta função pode ser subdividida em objetivos componentes, os quais, numa escala descendente em importância relativa, seriam:

- a) Fornecer ar para os trabalhadores na quantidade e qualidade necessárias;
- b) Fornecer a quantidade de ar necessária para diluir e tornar inofensivos gases tóxicos e explosivos;
- c) Fornecer ar com velocidade suficiente para remover da mina poeiras e gases;
- d) Controlar a umidade e temperatura do ar.

Para alcançar estes objetivos com segurança tem-se que escolher os caminhos adequados para o fluxo de ar (ramos), desde a sua entrada, passando pelas frentes de serviço, até o seu retorno à superfície, quando o ar já não apresenta condições próprias para uso (ar viciado).

A rota do ar puro é constituída geralmente do “*shaft*”, rampa ou galeria de acesso, galerias de transporte e frentes de desmonte; enquanto o retorno do ar é realizado através de galerias e chaminés escavadas especialmente para este propósito e/ou em desuso.

## 2.4 Fontes de fluxo de ar nas minas

O fluxo de ar existente entre dois pontos de uma mina é causado por uma diferença de pressão entre os mesmos. As diferentes pressões existentes em pontos distintos da mina são geradas por fontes naturais ou mecânicas.

A principal fonte natural que pode criar e manter um fluxo significativo de ar é a energia térmica resultante de diferenças de temperatura que ocasionam alterações de densidade do ar em setores distintos da mina. O fluxo causado por este fenômeno físico recebe a denominação de “*ventilação natural*”, e a pressão que o gera chama-se “*pressão de ventilação natural*”, mais conhecida como NVP (*natural ventilation pressure*)

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

## 2.5 Circulação geral do ar nas minas

A localização usual do ventilador principal é no topo da chaminé ou abertura de retorno, caracterizando um “*sistema aspirante*” ou “*por sucção*”. Em minas pouco profundas com solo fraturado, e em minas com velhos locais de trabalho apresentando comunicações com a superfície, a posição ideal para o ventilador é no topo da chaminé ou abertura de entrada, caracterizando um “*sistema soprante*” ou “*por sobrepressão*”. Do ponto de vista termodinâmico, a melhor localização para o ventilador é na base da chaminé de saída, caracterizando um “*sistema misto*”.

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

Para se exercer o controle do fluxo de ar, torna-se necessária a utilização de diversos dispositivos, tais como: paredes de alvenaria, cortinas, portas de ventilação (simples e duplas), reguladores, etc.

A Figura 2.1 representa um esquema de um sistema básico de ventilação de mina (VUTUKURI e LAMA, 1986).

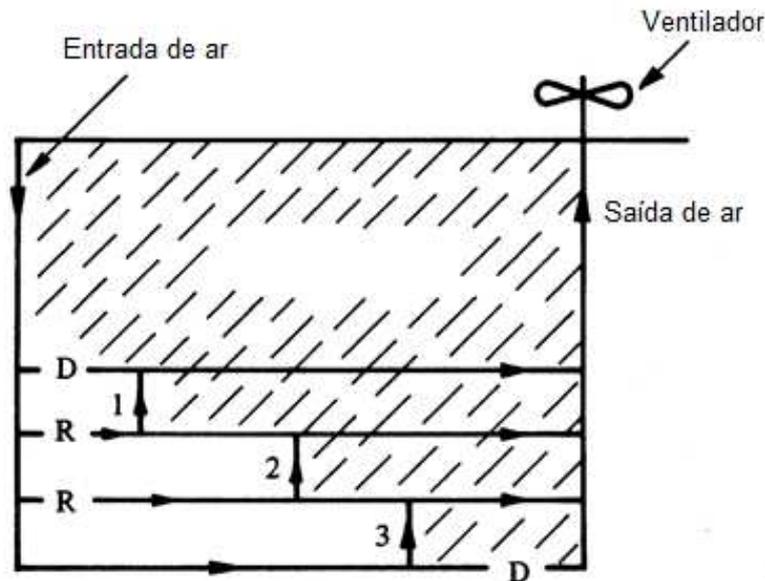


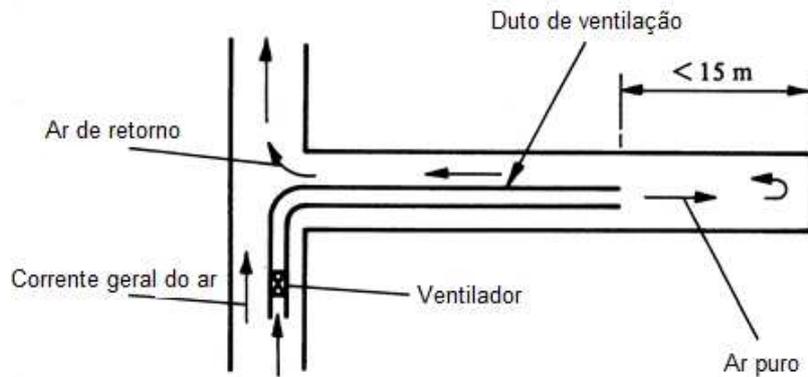
Figura 2.1 - Sistema básico de ventilação de mina: D – portas; R – reguladores; 1, 2, 3 - frentes de serviço (VUTUKURI e LAMA, 1986).

## 2.6 Ventilação auxiliar

Apesar da maioria das frentes de trabalho sejam percorridas pelo fluxo geral de ar, haverá normalmente alguns locais, tais como, frentes de desenvolvimento, oficinas, estações de carregamento da chaminé, etc. que necessitarão de ventilação auxiliar. Este tipo de ventilação requer um ventilador adicional e uma rota própria para o ar, que é geralmente um duto de ventilação. A ventilação auxiliar pode ser executada de três maneiras diferentes:

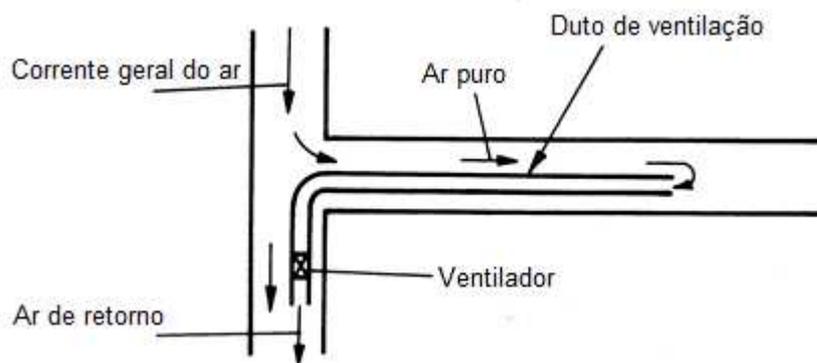
- a) Sistema Soprante – Quando uma parte do ar puro da galeria que dá acesso ao desenvolvimento é forçada por um ventilador através de um duto de ventilação até a frente do desenvolvimento, de onde retorna à corrente principal. A entrada do duto deverá se estender por pelo menos cinco metros, no sentido contrário à corrente de ar,

para evitar que o ar proveniente da frente de desenvolvimento seja recirculado. A Figura 2.2 ilustra essa situação.



**Figura 2.2 - Ventilação auxiliar soprante (VUTUKURI e LAMA, 1986).**

- b) Sistema Aspirante— Quando o ar da galeria de desenvolvimento é aspirado através de um duto de ventilação e automaticamente substituído pelo ar puro puxado da galeria. Do mesmo modo, para evitar a recirculação, a descarga do ar de retorno deverá se feita ao menos cinco metros da entrada do desenvolvimento, conforme mostra a Figura 2.3.



**Figura 2.3 - Ventilação auxiliar por exaustão (VUTUKURI e LAMA, 1986).**

- c) Sistema Misto – Quando se sobrepõe um duto auxiliar soprante ao sistema aspirante ou um duto auxiliar aspirante ao sistema soprante. As Figura 2.4 e 2.5 ilustram, respectivamente, os dois casos.

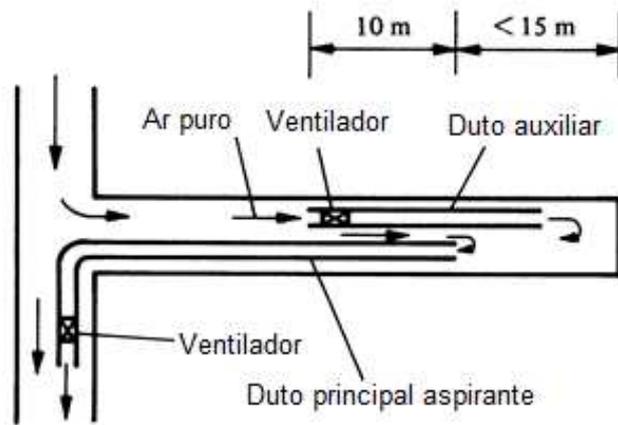


Figura 2.4 - Ventilação auxiliar por exaustão com reforço soprante (VUTUKURI e LAMA, 1986).

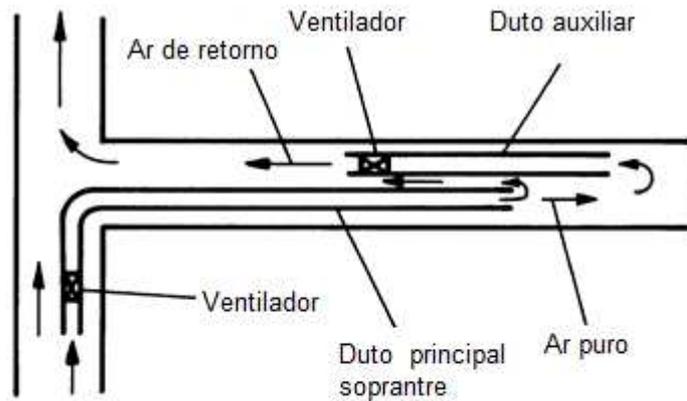


Figura 2.5 - Ventilação auxiliar soprante com reforço por exaustão (VUTUKURI e LAMA, 1986).

## 2.7 Fundamentos do fluxo de ar

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

### 2.7.1 A equação de continuidade ou conservação de massa

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

$$w_1 A_1 V_1 = w_2 A_2 V_2 = w_i A_i V_i = cte \quad (2.1)$$

onde, nos diversos pontos  $i = 1, 2, \dots$

$w_i$  = densidade do ar no ponto  $i$  ( $\text{kg/m}^3$ );

$A_i$  = área do fluxo, normal à sua direção, no ponto  $i$  ( $\text{m}^2$ );

$V_i$  = velocidade do fluxo no ponto  $i$  ( $\text{m/s}$ ).

Se a densidade do ar é constante nos trechos considerados,

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 = A_i V_i \quad (2.2)$$

ou ainda,

$$Q_1 = Q_2 = Q_i \quad (2.3)$$

onde  $Q_i$  representa a vazão no ponto  $i$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

### 2.7.2 A Equação de energia

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

$$\frac{P}{wg} + \frac{V^2}{2g} + H \quad (2.4)$$

onde  $g$  representa a aceleração da gravidade e  $w$  representa a densidade do ar. Em termos de pressão (energia por unidade de volume), o resultado é a pressão total em Pascal (Pa) dada por:

$$P + \frac{wV^2}{2} + Hwg \quad (2.5)$$

A equação de energia, também conhecida como equação de Bernoulli, diz que para um fluido ideal (sem fricção interna) e incompressível, a energia que entra em um sistema, é a mesma que o deixa. Portanto, ao se considerar duas secções transversais de um conduto, limitantes do sistema de fluxo entre elas, e expressar-se as formas de energia do fluxo, por unidade de volume ou em termos de pressão, tem-se que:

$$P_1 + w \frac{V_1^2}{2} + H_1wg = P_2 + w \frac{V_2^2}{2} + H_2wg \quad (2.6)$$

onde os índices 1 e 2 correspondem às secções consideradas.

### 2.7.3 Pressões estática, dinâmica e total

As pressões  $P_1$  e  $P_2$  na Equação (2.6) são referidas como pressões estáticas e agem em todas as direcções indiferentemente da direcção do fluxo. Os termos

$$w \frac{V_1^2}{2} \quad \text{e} \quad w \frac{V_2^2}{2} \quad (2.7)$$

têm também a dimensão de pressão e são referidos como pressões dinâmicas ou pressões de velocidade. As pressões totais são a soma das pressões estática e de velocidade

$$P + \frac{wV^2}{2} \quad (2.8)$$

porém alguns textos consideram a pressão total como a soma dos três termos da equação de Bernoulli, isto é,

$$P + \frac{wV^2}{2} + Hwg \quad (2.9)$$

#### 2.7.4 A equação de Bernoulli em ventilação de mina

A aplicação da Equação de Bernoulli estaria limitada, em princípio, para fluido ideal e incompressível; o que, não sendo o caso do ar, torna necessária a consideração de alguns aspectos relativos ao seu uso em ventilação de minas.

No que diz respeito à compressibilidade, pode-se demonstrar que para o ar em torno da pressão atmosférica com mudanças de altura inferiores a 500 m, e mudanças de velocidade que não excedam 100 m/s, a equação de Bernoulli produz pequenos erros, que podem ser considerados desprezíveis.

Chasteau (1974) demonstrou essa conclusão partindo de duas suposições: 1) que do ponto de vista prático, mudanças de até 5% na densidade de um fluido, permitem que o mesmo seja tratado como incompressível; 2) que a relação entre pressão estática e densidade seja linear, fazendo com que a mudança aceitável na pressão estática absoluta seja também de 5%.

Para mudanças na densidade maiores que 5%, faz-se necessário o uso de leis termodinâmicas para a análise do fluxo, pois mudanças na energia interna ou molecular do fluido e trocas de calor externo deverão constar da equação de balanço de energia.

Para atender a condição de viscosidade do ar, e conseqüentemente para se levar em conta as perdas de pressão, a equação de Bernoulli sofre uma adequação com a adição, ao seu lado direito, da perda de pressão total entre os pontos considerados. A equação de Bernoulli torna-se então,

$$P_1 + w \frac{V_1^2}{2} + H_1wg = P_2 + w \frac{V_2^2}{2} + H_2wg + p \quad (2.10)$$

onde  $p$  é a perda na pressão total entre os pontos 1 e 2.

No caso de se usar um ventilador, ou outro equipamento, que aumente a pressão total entre os pontos 1 e 2, a Equação (2.10) é novamente modificada pela adição, ao seu lado esquerdo, deste aumento de pressão total. Assim tem-se:

$$P_1 + w \frac{V_1^2}{2} + H_1 w g + p_v = P_2 + w \frac{V_2^2}{2} + H_2 w g + p \quad (2.11)$$

onde  $p_v$  representa o aumento na pressão total entre os pontos 1 e 2 devido ao ventilador.

### 2.7.5 Número de Reynolds

Quanto às trajetórias das partículas de um fluido em movimento, com respeito ao ordenamento e regularidade destas trajetórias (linhas de fluxo), a vazão de um fluido pode se apresentar nos estados laminar, turbulento ou intermediário. Para a determinação das fronteiras destes estados, adota-se o Número de Reynolds ( $R_e$ ), que é função das propriedades do fluido, sendo obtido da relação seguinte:

$$R_e = \frac{wDV}{\mu} = \frac{DV}{\nu} \quad (2.12)$$

onde  $R_e$  = número de Reynolds (adimensional)

$w$  = densidade do fluido ( $\text{kg/m}^3$ )

$\mu$  = viscosidade absoluta (Pa.s ou  $\text{kg/m.s}$ )

$\nu$  = viscosidade cinemática ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$D$  = diâmetro do duto (m)

$V$  = velocidade do fluxo (m/s)

De acordo com Hartman (1982), o fluxo é laminar quando  $R_e < 2000$ , enquanto que para  $R_e > 4000$ , o fluxo é turbulento. A região entre estes valores é conhecida como faixa intermediária. Outros autores consideram o valor de  $R_e = 2500$  como limite inferior para fluxo turbulento.

A velocidade que corresponde ao valor mais baixo da faixa de fluxo turbulento, para um determinado duto ou galeria, chama-se velocidade crítica ( $V_c$ ), acima da qual, o fluxo é sempre turbulento. Para o ar, considerando os valores de  $\mu = 1,84 \times 10^{-5}$  Pa.s e  $w = 1,2$  kg/m<sup>3</sup>, encontra-se o valor da velocidade crítica (em m/s) por  $V_c \cong 0,06/D$ .

Considerando esta última relação e a necessidade de se ter um fluxo de ar com velocidade suficiente para uma boa dispersão e remoção dos agentes contaminantes produzidos nos trabalhos mineiros, além das dimensões normalmente adotadas para galerias, em ventilação de mina prevalece o fluxo turbulento.

## 2.8 Resistência à ventilação

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

$$p = p_f + p_x \quad (2.13)$$

onde:  $p_f$  = perda de pressão por fricção (Pa)

$p_x$  = perda de pressão por choque (Pa).

### 2.8.1 Perda de pressão por fricção

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

$$p_f = \frac{KLCV^2}{A} \quad (2.14)$$

onde:  $K$  = fator de fricção ( $\text{Ns}^2/\text{m}^4$  ou  $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
 $L$  = comprimento da galeria (m)  
 $C$  = perímetro da galeria (m)  
 $V$  = velocidade do ar (m/s)  
 $A$  = área da seção transversal da galeria ( $\text{m}^2$ )

Considerando que a velocidade do ar não seja conhecida, sendo dada porém, a taxa de volume do ar, ou vazão  $Q$ , sabendo-se ainda que  $V = Q/A$ , tem-se:

$$p_f = \frac{KLCQ^2}{A^3} \quad (2.15)$$

onde  $Q$  = taxa de volume ou vazão do ar ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

### 2.8.2 O fator de fricção

O fator de fricção  $K$ , também conhecido como coeficiente de resistência aerodinâmica, varia de acordo com o número de Reynolds ( $R_e$ ). Para valores altos de  $R_e$ , que é o caso de galerias, esta variação torna-se insignificante, o que possibilita considerar o fator de fricção constante. Uma determinação mais precisa do fator de fricção  $K$  é feita por meio da medição da queda de pressão em uma galeria (ou trecho dela) e dos outros elementos considerados na equação de Atkinson para o trecho subterrâneo em questão. O fator de fricção local, portanto, pode ser obtido através da relação:

$$K = \frac{pA^3}{CLQ^2} \quad (2.16)$$

Para propósitos de estimativa ou de projeto, pode-se recorrer a diversas tabelas que fornecem os fatores de fricção para os vários tipos de galerias no que se refere às suas condições e à sua formação rochosa (HARTMAN, 1982).

### 2.8.3 Determinação da resistência

Para uma determinada galeria, o termo  $KLC/A^3$  da equação de Atkinson é constante, sendo representado por  $R$ , permitindo que a equação possa ser expressa por:

$$p_f = RQ^2 \quad (2.17)$$

onde  $R$  representa a resistência dos trabalhos mineiros à passagem do ar e tem como unidade  $Ns^2/m^8$  ou  $kg/m^7$ .

### 2.8.4 Perdas de pressão por choque

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

$$p_x = \frac{\theta w V^2}{2} \quad (2.18)$$

onde :  $\theta$  = fator de perda por choque (adimensional);

$w$  = densidade do ar ( $kg/m^3$ );

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

O fator de perda  $\theta$  é específico para cada fonte de perda, ou seja, cada curva, mudança de área ou obstrução tem seu próprio fator de perda, dependendo de suas dimensões e características. Estes fatores são determinados através de fórmulas empíricas acompanhadas por figuras ilustrativas e gráficos auxiliares (HARTMAN, 1982).

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

Uma fórmula que expresse o comprimento equivalente de galeria retilínea devido a uma perda de pressão por choque, pode ser encontrada igualando-se as perdas por choque e por fricção. Assim,

$$p_f = p_x \quad (2.19)$$

ou

$$\frac{KLCV^2}{A} = \frac{\theta_w V^2}{2} \quad (2.20)$$

Expressando o comprimento  $L$  como o valor do comprimento equivalente  $L_e$ , obtem-se:

$$L_e = \frac{\theta_w A}{2KC} \quad (2.21)$$

### 2.8.5 Perda total de pressão

Se na determinação da queda de pressão entre dois pontos de um sistema de ventilação de mina, são incluídos os fatores causadores de perda de pressão por choque, através, por exemplo, dos seus respectivos comprimentos de galeria equivalentes, as equações das perdas de pressão por fricção são alteradas respectivamente para:

$$p = \frac{K(L + L_e)CQ^2}{A^3} \quad (2.22)$$

$$p = RQ^2 \quad (2.23)$$

onde  $p$  representa todas as perdas de pressão (por fricção e choque) no trecho considerado.

A Equação (2.23) representa uma galeria ou sistema de galerias que formam um circuito de ventilação e corresponde graficamente a uma parábola que passa na origem de um sistema de coordenadas  $p$ - $Q$ , conforme mostrado na Figura 2.6. Esta representação gráfica é conhecida como curva característica da galeria ou mina.

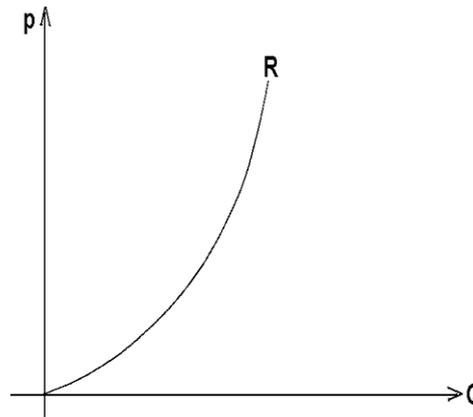


Figura 2.6 - Curva característica de galeria ou mina (YANES, 1977).

### 2.8.6 Potência requerida para o fluxo do ar

O trabalho consumido por um fluxo de ar de área seccional  $A$  que se desloca de uma distância  $l$  em um tempo  $t$  contra uma diferença de pressão  $p$  é dado por  $pAl$  e a potência requerida para tal trabalho é dada por  $pAl/t$ .

Como 
$$\frac{Al}{t} = Q \quad (2.24)$$

$$W = pQ \quad (2.25)$$

onde  $W$  = potência requerida para o fluxo do ar (Watt).

## 2.9 Ventiladores

Os ventiladores são equipamentos mecânicos capazes de induzir uma corrente de ar através da criação de uma diferença de pressão entre seus lados de entrada e saída. Os principais elementos que constituem um ventilador são: fonte de potência ou motor, impulsor ou hélice e carcaça, além de aberturas de entrada e saída do ar. Nos cálculos de operação de

ventiladores, costuma-se supor o ar incompressível, isto é, o volume de ar entre a entrada e a descarga do ventilador, permanece constante. Na realidade, existe uma redução de volume, devida à compressão, inferior a 7% (DE LA HARPE, 1974).

### 2.9.1 Pressão do ventilador

A pressão de um ventilador é expressa em termos da elevação de pressão entre os dois lados do mesmo. Dois tipos de pressão do ventilador são considerados: pressão estática e pressão total.

A pressão total do ventilador é igual à sua pressão estática mais a pressão dinâmica correspondente à velocidade média na descarga (obtida dividindo-se a taxa de fluxo de volume pela área do orifício de descarga). Tem-se então,

$$F_T = F_S + F_V \quad (2.26)$$

onde  $F_T$  = pressão total do ventilador  
 $F_S$  = pressão estática do ventilador  
 $F_V$  = pressão dinâmica do ventilador.

Sabe-se ainda que:

$$V = Q/A \quad (2.27)$$

e

$$F_V = \frac{wV^2}{2} \quad (2.28)$$

onde  $V$  = velocidade média na descarga  
 $Q$  = vazão do ventilador  
 $A$  = área do orifício de descarga  
 $w$  = densidade do ar.

Determinando-se experimentalmente a pressão estática e a vazão de descarga do ventilador, pode-se calcular a pressão dinâmica e a pressão total com auxílio das Equações (2.26), (2.27) e (2.28).

A pressão estática é mais usada, sendo conhecida como pressão útil do ventilador; porém, em se tratando de ventiladores maiores, as pressões dinâmica e total são também consideradas.

### 2.9.2 Potência e eficiência do ventilador

A equação “ $W = pQ$ ” permite calcular a potência do ar ( $W$ ) que corresponde à vazão numa dada pressão. Quando a pressão considerada é a pressão total do ventilador, o resultado é conhecido como potência total do ar ( $W_T$ ). Para o caso de se usar a pressão estática do ventilador, o resultado é conhecido como potência estática do ar ( $W_S$ ). Ambos os resultados são uma medida da potência de saída do ventilador, total ou estática, conforme o caso considerado. A potência mecânica ( $W_M$ ) que impulsiona o ventilador, por sua vez, corresponde à potência de entrada do ventilador.

A eficiência do ventilador é determinada pela razão da sua potência de saída para a sua potência de entrada, expressa em porcentagem. De acordo com a potência de saída considerada, pode-se obter a eficiência total ( $\eta_T$ ) ou eficiência estática ( $\eta_S$ ), conforme as Equações (2.29) e (2.30).

$$\eta_T = \frac{W_T}{W_M} \quad (2.29)$$

$$\eta_S = \frac{W_S}{W_M} \quad (2.30)$$

As potências e eficiências dos ventiladores costumam ser empregadas na comparação de seus desempenhos, sendo, portanto, frequentemente representadas por curvas características, juntamente com as pressões e quantidades de fluxo. A Figura 2.7 apresenta curvas características de um ventilador em termos de pressão, potência e eficiência, com relação à quantidade de fluxo.



Figura 2.7 - Curvas características de ventilador (VUTUKURI e LAMA, 1986).

A avaliação ou classificação do ventilador é expressa através dos valores de pressão, vazão, potência e eficiência, no cume da sua curva de eficiência. As curvas de desempenho são traçadas, geralmente, considerando-se algumas características constantes, tais como, o diâmetro e velocidade do impulsor e a densidade do ar.

### 2.9.3 Tipos de ventiladores

De acordo com a direção do fluxo de ar gerado, em relação ao seu eixo de rotação, existem duas grandes categorias de ventiladores que são os de fluxo radial ou centrífugos e os de fluxo axial.

Nos ventiladores centrífugos, o impulsor ou hélice, gira dentro de uma carcaça em forma de espiral, que coleta o ar através de uma ou duas aberturas localizadas respectivamente em um ou nos dois lados do impulsor. O ar coletado é canalizado e descarregado radialmente através do difusor. A Figura 2.8 mostra um esquema dos elementos básicos de um ventilador centrífugo (VUTUKURI e LAMA, 1986).

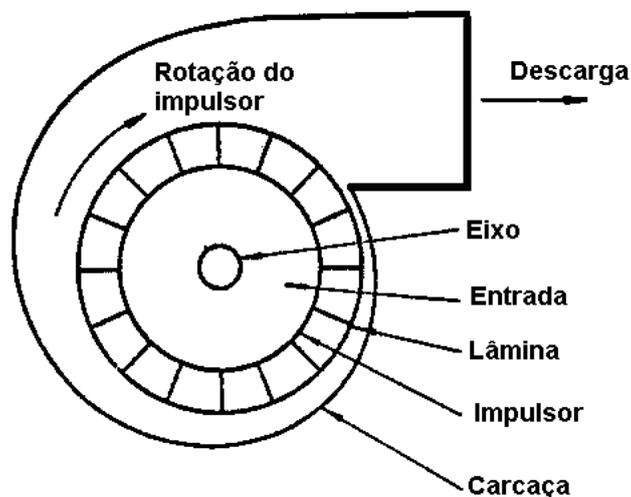


Figura 2.8 - Elementos básicos de um ventilador centrífugo (VUTUKURI e LAMA, 1986).

Nos ventiladores de fluxo axial, o impulsor, que consta de pás montadas em disco ou em uma superfície aerodinâmica, gira em uma seção cilíndrica da carcaça. O ar que entra no impulsor com uma direção axial, o deixa com uma componente rotacional devida ao trabalho realizado pelo seu momento de rotação. Esta componente rotacional não contribui para a pressão útil do ventilador que, portanto, torna-se menor que a pressão total gerada pelo impulsor.

Para se ter uma quantidade máxima de pressão útil, a maioria dos ventiladores de fluxo axial é provida de paletas guias estacionárias, colocadas após o impulsor, com a finalidade de alinhar o fluxo de ar, removendo sua componente rotacional e convertendo, portanto, algum excesso de pressão de velocidade em mais pressão estática útil.

A carcaça de um ventilador de fluxo axial consta, além da seção cilíndrica que envolve o impulsor, de um cone de entrada e um difusor, que servem para reduzir as perdas de pressão por choque na entrada e descarga do ar. A Figura 2.9 mostra os principais elementos de um ventilador de fluxo axial (VUTUKURI e LAMA, 1986).

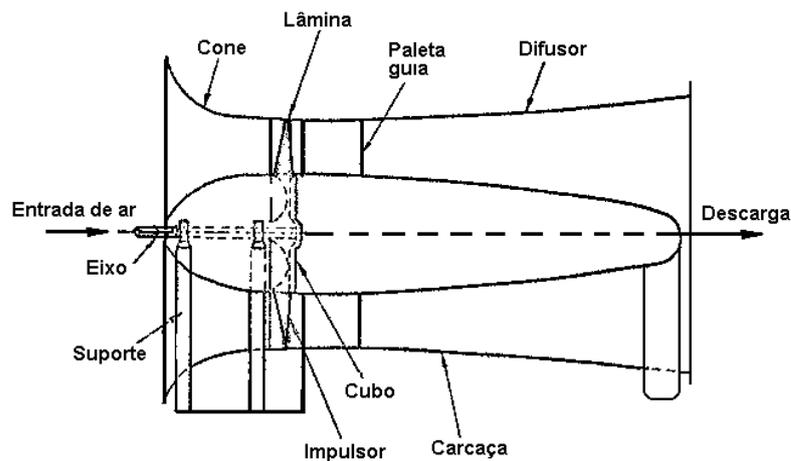


Figura 2.9 - Elementos básicos de um ventilador axial (VUTUKURI e LAMA, 1986).

Alguns ventiladores possuem dois ou três impulsores, colocados em série, cada um com suas próprias paletas guias, sendo chamados por isso, ventiladores de dois ou três estágios (VUTUKURI e LAMA, 1986).

#### 2.9.4 Leis do ventilador

A vazão, pressão e potência de um ventilador, normalmente determinadas pelo fluxo e resistência do sistema no qual ele opera, estão relacionadas com algumas variáveis que exercem influência considerável no seu desempenho. Estas relações, conhecidas como leis do ventilador, são válidas para uma dada resistência do sistema de ventilação, isto é, para um ponto determinado de operação na curva característica pressão versus vazão, e são as seguintes:

$$\text{Vazão} \quad Q \propto n D_i^3 \quad (2.31)$$

$$\text{Pressão} \quad F \propto n^2 D_i^2 w \quad (2.32)$$

$$\text{Potência} \quad W \propto n^3 D_i^5 w \quad (2.33)$$

Sendo:

$n$  = velocidade de rotação do impulsor;

$D_i$  = diâmetro do impulsor;

$w$  = densidade do ar.

As leis do ventilador permitem traçar curvas características para um ventilador a diferentes velocidades e densidades do ar a partir de uma curva conhecida com velocidade e densidade do ar determinadas, bem como a determinação de curvas para ventiladores similares de dimensões diferentes.

### **2.9.5 Seleção de ventiladores**

Algumas expressões empregadas na seleção de ventiladores podem ser determinadas com base nas leis do ventilador. Uma dessas expressões é a velocidade específica  $n_s$ , que corresponde à velocidade de rotação de um ventilador, a qual resulta no fornecimento de uma unidade de vazão e uma unidade de pressão do ventilador.

Utilizando as relações (2.31) e (2.32), a seguinte expressão para a velocidade específica de um ventilador de qualquer diâmetro foi obtida (VUTUKURI e LAMA, 1986).

$$n_s = \frac{nQ^{1/2}}{F^{3/4}} \quad (2.34)$$

### **2.9.6 Ponto de operação do sistema de ventilação**

O ponto de operação de um sistema de ventilação é aquele que corresponde à pressão e à vazão resultantes de uma determinada velocidade de operação do ventilador para uma dada densidade do ar. Uma vez selecionado um ventilador para um determinado sistema de ventilação de mina, e sabendo-se que a pressão por ele gerada deve suprir todas as perdas de pressão das galerias e dos outros serviços mineiros que compõem o referido sistema, o ponto de operação é determinado pela interseção das curvas características da mina e do ventilador. Desde que sejam traçadas, a potência e a eficiência do ventilador, que correspondem à vazão de operação do mesmo, podem também ser lidas, conforme mostra a Figura 2.10 (VUTUKURI e LAMA, 1986).

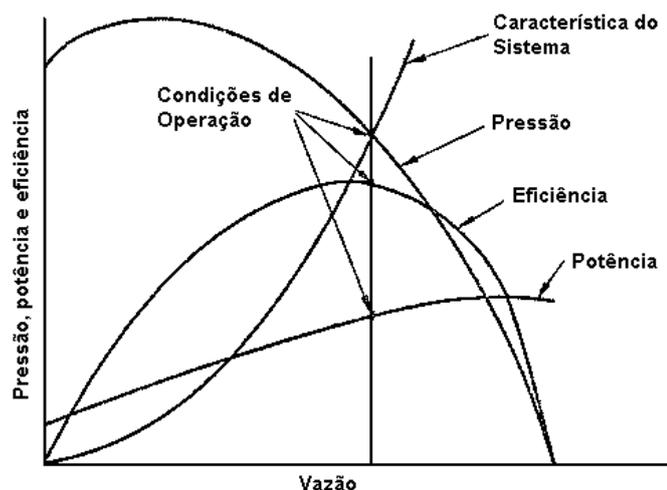


Figura 2.10 - Determinação das condições de operação do ventilador (VUTUKURI e LAMA, 1986).

## 2.10 Painéis elétricos

Os painéis elétricos possuem chaves de partida utilizadas para o acionamento dos motores dos ventiladores que, além de exercerem papel fundamental no funcionamento e vida útil do equipamento, têm grande influência no consumo de energia elétrica. Tendo em vista que a corrente de partida requerida é muito alta quando comparada com a corrente nominal do equipamento, a partida dos motores elétricos trifásicos, utilizados nos ventiladores, pode causar diversos problemas. Isso ocorre pela necessidade de uma força capaz de tirar o motor do estado de inércia. A Figura 2.11 mostra o comportamento da corrente durante a partida do motor de um ventilador (BRUNA *et al.*, 2012).

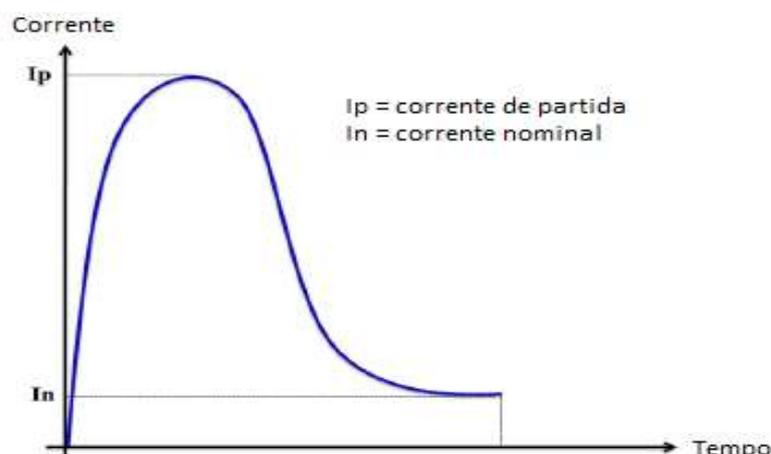


Figura 2.11 - Pico da corrente de partida de um motor elétrico (BRUNA *et al.*, 2012).

Com o objetivo de minimizar os efeitos negativos causados pelo acionamento dos motores dos ventiladores, são usadas chaves de partida que possam suavizar a corrente de partida, deixando-a mais próxima da corrente nominal. Dentre os diversos tipos existentes de chaves de partida, destacam-se a “Chave *Soft-Starter*” e a “Chave com Inversor de Frequência”.

As chaves do tipo *soft-starter* são capazes de controlar a rampa de tensão na partida do motor, evitando os saltos repentinos na corrente de partida, contribuindo tanto para uma economia no consumo de energia, como para um menor desgaste do motor. Este tipo de chave, entretanto, não permite o ajuste de frequências, tornando o sistema de ventilação um pouco rígido devido à falta de flexibilidade da rotação do ventilador que permanece normalmente no seu valor máximo (BRUNA *et al.*, 2012).

As chaves do tipo inversor de frequência operam basicamente transformando a tensão alternada em contínua, para transformá-la em tensão de frequência e amplitudes ajustáveis. Têm a grande vantagem, em relação às do tipo *soft-starter*, de permitir que o ventilador possa trabalhar com rotações variáveis de acordo com a demanda da mina, alterando a potência de trabalho do motor, exercendo influência no consumo de energia (BRUNA *et al.*, 2012).

## **2.11 Automação industrial e controle remoto**

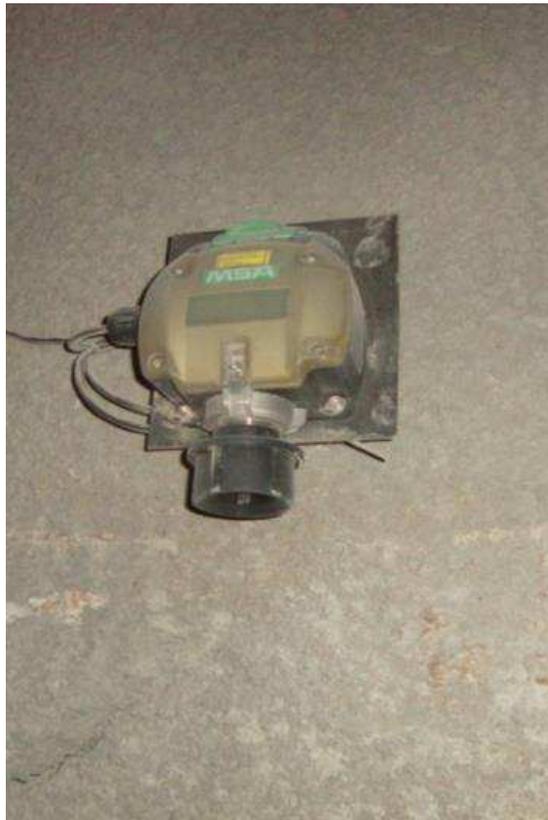
O termo automação diz respeito ao controle automático dos equipamentos, onde as ações deixam de depender da intervenção humana. Para a implantação da automação, são utilizados diversos dispositivos, sendo o CLP (Controle Lógico Programável), o mais difundido entre eles. Segundo a Associação Nacional dos Fabricantes Elétricos (NEMA) o CLP “é uma aparelho digital que consta de uma memória interna programável capaz de armazenar instruções para implementações específicas, tais como, lógica, sequenciamento, temporização, contagem e aritmética, para controlar por meio de módulos de entrada e saída vários tipos de máquinas e processos”.

De acordo com Parede *et al.* (2011), as vantagens do uso do CLP são:

- Melhoria do processo;
- Maior produtividade;

- Menor índice de falhas;
- Menor tempo de máquina parada;
- Maior segurança nas operações;
- Menor consumo de energia;
- Maior confiabilidade;
- Manutenção mais simples;
- Maior flexibilidade e agilidade.

O controle remoto tem como função principal tornar as operações mais rápidas e simples, sem a necessidade de deslocar um técnico ao campo, nem expor o mesmo a algum risco. Com o controle remoto é possível exercer o comando de diversas atividades a partir de uma central situada na superfície, tendo o total domínio sobre as operações. Elementos essenciais à automação e monitoramento de ventiladores são mostrados nas Figura 2.12 e 2.13.



**Figura 2.12 - Sensor de Monóxido de Carbono.**



Figura 2. 13 - Painel de automação contendo o Controle Lógico Programável (CLP).

## 2.12 Software de ventilação

Um dos programas computacionais mais usados e conhecidos para aplicação em sistemas de ventilação de mina é o Ventsim. Trata-se de um software de origem australiana, bastante apropriado para a realização de análises de circuitos de ventilação completos ou setorizados. Quando atualizado com os dados do sistema de ventilação, torna-se uma ferramenta de suma importância para a tomada de decisões relativas ao aperfeiçoamento desse sistema. Na FERBASA, os dados geométricos da mina, necessários para a execução de simulações, são importados diretamente do softwares TopoGRAPH ou Vulcan, podendo ainda ser introduzidos diretamente por meio de uma tela de diálogos. Os resultados podem ser apresentados sob a forma de fluxo, velocidade, pressão manométrica ou barométrica, diferenças de pressão, potência ou temperatura.

Como exemplo do uso de alternativas para análise por meio de simulações, pode-se citar a implantação ou substituição de ventiladores para suprimento da demanda de ar em

determinadas frentes, ou alterações no circuito de ventilação com o avanço ou recuo de dutos, etc. Os resultados das simulações, quando satisfatórios, podem ser postos em prática com segurança, evitando possíveis desperdícios de tempo e materiais quando testados diretamente no campo. A Figura 2.14 mostra uma tela do Ventsim, onde se pode observar a distribuição do fluxo de ar através das aberturas (rampas, travessas e galerias) e a caixa de diálogo para a introdução de dados paramétricos do sistema de ventilação. Na Figura 2.15, o circuito de ventilação completo da mina Ipueira é mostrado em tela do software Ventsim.

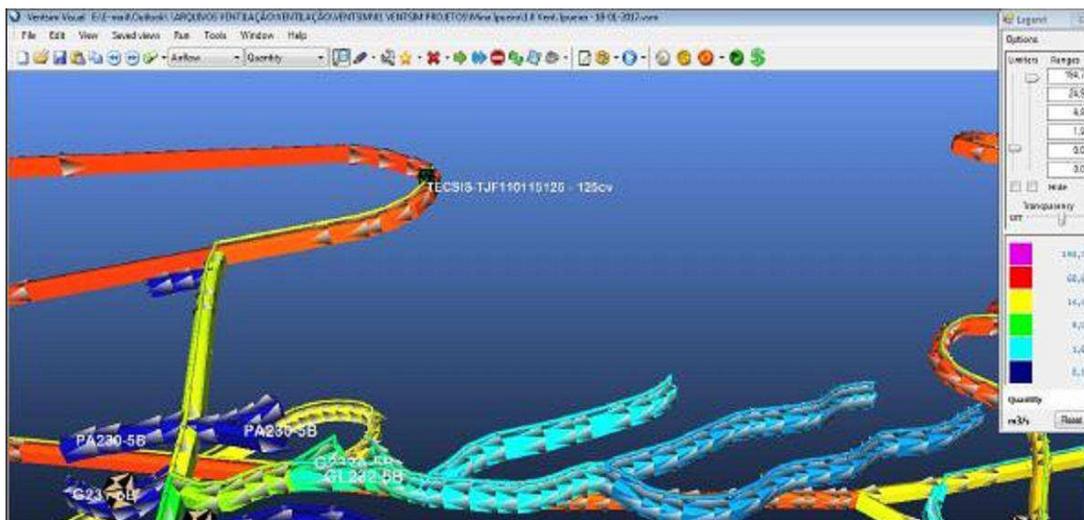


Figura 2.14 - Tela do Ventsim com caixa de diálogo para entrada de dados.

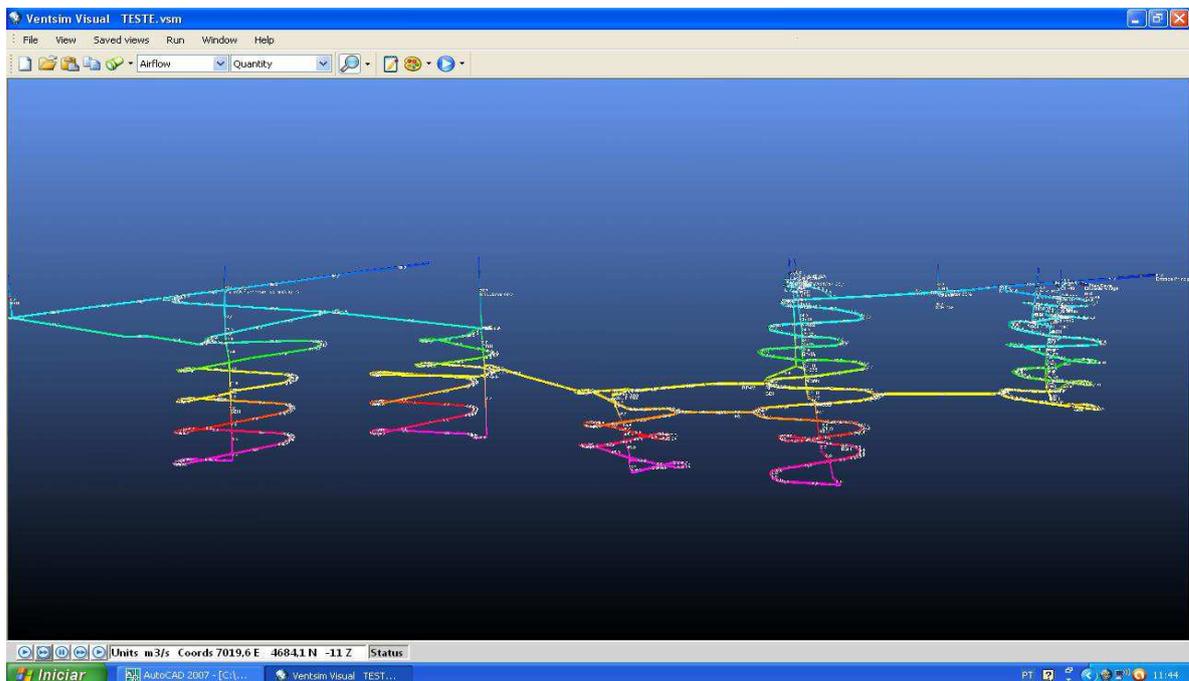


Figura 2.15 - Circuito completo de ventilação da mina Ipueira mostrado no Ventsim.

**CAPÍTULO 3**

**REVISÃO DA LITERATURA**

## CAPÍTULO 3

### 3. REVISÃO DA LITERATURA

Alguns estudos recentes são encontrados na literatura envolvendo sistemas de ventilação de minas. O *National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)* realizou uma pesquisa para melhorar a ventilação em minas de grande porte (GRAU e KROG, 2009).

A pesquisa mostrou que a ventilação nestes tipos de mina melhora significativamente com a inclusão de requisitos de ventilação no processo de planejamento da mina e implantação de algumas técnicas práticas durante as atividades de mineração. Planejando a localização de longos pilares para reduzir o número de travessas entre a entrada e o retorno de passagens de ar, posicionando ventiladores auxiliares nos seus locais apropriados, e estabelecendo paradas de ventilação com vazamento mínimo, é possível melhorar significativamente a ventilação de minas de grande porte. Minas que adotam estas técnicas no plano de ventilação reduzem a exposição dos mineiros aos componentes contaminantes do ar.

Kocsis e Hardcastle (2004) publicaram artigo sobre estudo de custos operacionais de sistemas de ventilação, fazendo uma comparação entre sistemas de ventilação de minas metálicas subterrâneas com modo de operação convencional e automatizada.

De acordo com esse estudo, uma vez projetadas, as minas tendem a ter seu sistema de ventilação operando em nível de pico, excedendo as necessidades diárias de desenvolvimento e produção devido a falta de controles adequados de ventilação. Em minas metálicas subterrâneas, o uso do sistema “Telemetry<sup>TM</sup>”, que inclui a operação remota, de equipamentos de produção, mudará critérios do projeto da mina, incluindo sua infraestrutura de suporte tais como o sistema de ventilação.

O sistema “Telemetry<sup>TM</sup>” é o resultado de pesquisas desenvolvidas pelo “Programa de Automação de Mineração (MAP)”, uma colaboração internacional entre Inco, Sandvick, Tamrock, Dyno Nobel e CAN-MET, o setor de pesquisas minerais dos Recursos Naturais do Canadá. Com a remoção de operadores de máquinas para salas de controle de superfície, sistemas de ventilação convencionais concebidos para diluir e remover poluentes

podem se tornar redundantes. Dependendo da necessidade máxima de ventilação, seu custo em minas automatizadas com equipamento tele-remoto operado a partir da superfície será menor do que o custo da ventilação em minas convencionais. Tal economia de custos, que poderá ser significativa, resultará não apenas da capacidade de reduzir a quantidade de ventilação na mina, como também da capacidade de automatizar a sua distribuição. O estudo fornece uma indicação das novas necessidades de fluxo de ar em stopes e frentes de desenvolvimento para os processos de mineração automatizada e operação tele-remota baseados na modelagem climática.

A introdução de sistemas inteligentes para mineração subterrânea pode fornecer uma melhoria significativa no desempenho de uma mina quando comparados com técnicas convencionais de mineração (BAIDEN, 2001). Minas metálicas canadenses semelhantes às de outros países desenvolvidos, estão aumentando o nível de automação de seus equipamentos pelas seguintes razões:

- a) Aumento da segurança no local de trabalho através da relocação da mão-de-obra para salas de controle seguras na superfície.
- b) Aumento da eficiência dos trabalhadores com a remoção do tempo de viagem de operadores de máquinas para locais de trabalho subterrâneos.
- c) Aumento da segurança e redução dos atrasos de produção tais como atrasos de reentrada para operações de controle do solo (projeção de concreto) após operação de desmonte.
- d) Redução dos custos de produção como consequência da aceleração dos ciclos de operação, do aumento da utilização dos equipamentos e, portanto, menos peças de equipamento, manutenção reduzida, maior segurança e controle de qualidade.

Sabendo-se que o sistema de ventilação de mina por meio de ventiladores que operam com capacidade máxima ocasiona maior consumo de energia, Petrov e Popov (2004) propuseram maneiras para melhorar a economia e a confiabilidade de sistemas de ventilação, através da redução no consumo efetivo gerado pela ventilação, e melhoria da segurança operacional destes sistemas.

Uma análise numérica e experimental de diferentes sistemas de ventilação em minas profundas foi realizada (PARRA *et al.*, 2006). O trabalho apresenta um estudo em sistemas de

ventilação trabalhando na parte mais profunda de uma mina de carvão. As medidas tomadas em uma galeria de mina real com uma anemometria de fio quente foram utilizadas para validar o modelo numérico. Três tipos diferentes de sistemas de ventilação foram examinados numericamente: sopro, exaustão e ventilação mista. Os modelos numéricos apresentados fornecem informações detalhadas sobre o campo de escoamento, idade média do ar e a concentração de metano. Esta informação permite contrastar a eficiência do sistema de ventilação com relação a diversos critérios: regiões de contaminação, regiões de ar contaminado, e risco de regiões de explosões.

Dinâmica de fluido computacional (CFD) é uma técnica numérica por meio da qual, problemas complexos de fluxo de fluido podem ser resolvidos utilizando-se computadores. Visando transferir conhecimentos de CFD para analisar e projetar um sistema de ventilação das frentes, Wala *et al.* (2007) realizaram um estudo abrangente de validação de ferramentas atuais de CFD relacionado com experimentos de *benchmark* (correlação de variáveis operacionais típicas) na área de mineração. Nos últimos quatro anos, esses estudos financiados pelo *Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)*, foram realizados no Departamento de Engenharia de Minas da Universidade de Kentucky. Uma ampla variedade de configurações de sistemas de ventilação foi considerada. Recentemente, um estudo adicional foi realizado em cooperação com o *Pittsburgh Research Laboratory (PRL)*. Os autores apresentaram e discutiram os dados de simulação computacional, comparando os mesmos com dados coletados durante os estudos de laboratório do *NIOSH*.

Todos os estudos recentes que visam aperfeiçoar os sistemas de ventilação de minas subterrâneas, notadamente desenvolvidos na última década, vêm despertando grande interesse na Indústria da Mineração, fazendo surgir a adoção de um novo conceito em sistemas de ventilação de minas subterrâneas que é o de “ventilação sob demanda” (VOD). As pesquisas desenvolvidas, relativas ao tema, tem resultado na aplicação de diversas ações inovadoras nos sistemas de ventilação de mina atuais visando torná-los mais eficientes, principalmente no que diz respeito a uma significativa redução do consumo de energia, que na maioria dos casos gira em torno de 50% de todo o custo de energia dispensado a todas as atividades realizadas em subsolo.

Merece destaque alguns estudos publicados muito recentemente, que favorecem, por meio da implantação de diversas ações em um sistema de ventilação de mina, a sua caracterização como um “sistema de ventilação sob demanda”.

Em um desses estudos, Gari *et al.* (2011) mostraram que o sistema de ventilação sob demanda (VOD) tem sido proposto e testado recentemente em minas canadenses. A fim de fornecer os volumes de ar necessários para as áreas de produção de uma mina, os operadores precisam conhecer a causa e efeito de quaisquer mudanças solicitadas a partir do sistema de VOD. Uma análise de sensibilidade é desenvolvida através da geração de uma matriz de causa e efeito de fatores de sensibilidade em dadas alterações de parâmetros em um sistema de ventilação. Este novo utilitário, que foi incorporado no simulador de ventilação de mina 3D-CANVENT, é capaz de prever as distribuições de fluxo de ar em uma rede de ventilação quando as condições subterrâneas e controles de ventilação são alterados.

Para um sistema de ventilação principal, o software pode determinar a velocidade de funcionamento ideal dos ventiladores principais para satisfazer as exigências de fluxo de ar em frentes subterrâneas sem necessariamente usar os ventiladores de reforço e reguladores do local. Uma tabela otimizada de horário versus velocidade de funcionamento do ventilador asseguraria variável suprimento de ar fresco com base na demanda para as áreas de produção de forma eficaz, gerando uma economia significativa no consumo de energia e no custo operacional. (GARI *et al.*, 2011)

Atualmente, a maioria dos sistemas de ventilação de minas são ineficientemente concebidos, sendo mais focados para facilitar a flexibilidade de produção do que para minimizar o consumo de energia e sua pegada ambiental (zona do meio ambiente impactado). O sistema de ventilação sob demanda (VOD), conforme avaliado em algumas minas canadenses, está se dirigindo ao funcionamento de ventiladores auxiliares que ventilam cada local de trabalho onde acontece a atividade de mineração (HARDCASTLE *et al.*, 2005; HARDCASTLE *et al.*, 2006).

Para adotar a ventilação sob demanda no sistema principal de toda a mina, os operadores terão de conhecer a causa e efeito de qualquer alteração solicitada do sistema de ventilação automatizado. Para evitar atrasos, esta mudança para atender a um novo cenário de demanda de produção tem de ser imediato; ele não pode esperar por um computador para

avaliar a suas opções. O principal objetivo desse estudo é predeterminar quais ventiladores ou reguladores posicionados em certos locais irão aumentar ou diminuir o fluxo de ar nas outras áreas da mina e identificar qualquer tendência de reversão do fluxo de ar. Este objetivo pode ser alcançado pela utilização do módulo de sensibilidade, desenvolvido e incorporado no 3D-CANVENT, um simulador de ventilação de minas desenvolvido no CANMET, Recursos Naturais do Canadá (LI *et al.*, 2011).

O módulo consiste de um algoritmo que repetidamente resolve o sistema de ventilação de mina para mudanças determinadas nos parâmetros de ventilação e uma interface gráfica que exibe a redistribuição da vazão de ar causada pela alteração do parâmetro. O usuário pode definir as taxas de variação na resistência dos ramos, a pressão do ventilador ou velocidade de rotação do ventilador em uma rede de ventilação e, em seguida executar o módulo de resolução do software para gerar a matriz de fatores de sensibilidade. A variação na distribuição de fluxo de ar e as pressões de operação do ventilador podem ser determinadas a partir dos fatores de sensibilidade e exibidos dinamicamente nos esquemas de ventilação.

Em outro trabalho, Souza (2015) mostra que a energia associada com ventilação em uma operação subterrânea compreende uma parcela significativa da demanda de energia das operações de uma mina sendo, portanto, responsável por uma grande percentagem dos custos operacionais totais. Os sistemas de ventilação são responsáveis por 25 a 40% dos custos totais de energia e por 40 a 50% do consumo de energia das operações de uma mina.

Ventiladores são os dispositivos mecânicos mais importantes utilizados para ventilar as minas subterrâneas e a potência de ventilador total instalada em uma mina pode facilmente exceder 10.000 kW. Investigações de uma série de instalações de ventilador principal de mina mostraram sua montagem como sendo, em geral, ineficiente em termos de energia. O autor encontrou que 40 a 80% da energia consumida por um ventilador principal é utilizada para vencer a resistência imposta pelos componentes da estrutura do ventilador.

Princípios de projeto de engenharia podem ser aplicados para melhorar o desempenho e a eficiência das instalações de ventilador, resultando em reduções substanciais no consumo de energia, custos de operação e emissão de gases. Um estudo de caso detalhado é apresentado para demonstrar que, através da concepção do uso de ventiladores usando-se conceitos adequados de engenharia de mecânica de fluidos e projeto de ventilação industrial, sistemas

de ventiladores principais operarão em eficiências bem acima de 80 a 90% (em comparação com eficiências operacionais comuns que estão entre 20 e 65%), resultando em uma redução drástica nos custos gerais de uma mina e nas cargas de energia e elétrica.

Kaiyan *et al.* (2015) mostram que em redes de ventilação de minas, a razoável distribuição do fluxo de ar é muito importante para a produção segurança e economia. Três problemas básicos de distribuição: natural, completamente controlada e semi-controlada foram revistos neste artigo.

Visando a dificuldade elevada do problema de distribuição semi- controlada, o modelo matemático geral não linear multi- objetivos de otimização com restrições foi estabelecida com base na teoria de redes de ventilação de minas.

Um novo algoritmo, que combinou avaliação diferencial melhorada e o método do caminho crítico (CPM) com base na estratégia de solução separada multivariada, foi apresentado para procurar a solução ótima global mais eficiente. Em cada passo de evolução, as soluções viáveis de distribuição de vazão de ar são, em primeiro lugar, produzidas pelo algoritmo de evolução diferencial melhorada, e em seguida as soluções ótimas de queda de pressão do regulador são obtidas pelo CPM. Por meio de um número finito de iterações, a melhor solução pode ser dada. Neste novo algoritmo, a população de soluções viáveis foram classificadas e agrupadas para aumentar a capacidade de pesquisa global e os indivíduos no grupo geral foram aleatoriamente inicializados para manter a diversidade.

Enquanto isso, as vizinhanças individuais no melhor grupo que podem estar próximas das soluções ótimas foram pesquisadas localmente e ligeiramente para alcançar um equilíbrio entre a procura global e busca local, melhorando dessa forma a taxa de convergência. O programa de computador foi desenvolvido com base neste método.

Finalmente, as duas redes de ventilação com um único ventilador e multi ventiladores foram resolvidas. Os resultados mostram que este algoritmo tem vantagens de alta eficácia, convergência rápida, boa robustez e flexibilidade. Este programa de computador pode ser usado para solução em larga escala de problemas de otimização de redes de ventilação generalizadas no futuro (KAIYAN *et al.*, 2015).

De acordo com Chatterjee *et al.* (2015), na situação atual da crise energética, a indústria de mineração tem sido identificada como uma área promissora para a aplicação de técnicas de gestão da demanda (DSM). Este artigo investiga o potencial de economias de energia e economias de energia reais (atuais), pela implementação de acionamentos de velocidade variável aos ventiladores em minas subterrâneas.

Em particular, a ventilação sob demanda é considerado no estudo, isto é, o volume de ar é ajustado de acordo com a demanda em diferentes tempos. Duas estratégias de gestão da demanda (DSM), a eficiência energética (EE) e de gestão de carga (LM), são formuladas e analisadas. Ao modelar a rede com a ajuda de leis de Kirchhoff e teorema de Tellegen, um modelo de minimização não-linear restrita é desenvolvido, com o objectivo de atingir EE. O modelo também é feito para aderir às leis de ventilador, de modo que a potência do ventilador em seus pontos de operação é encontrada para alcançar resultados realistas. LM é obtida encontrando o tempo de partida ótimo da programação de mineração, de acordo com a taxa do tempo de uso (TOU). Um estudo de caso é apresentado para demonstrar os efeitos do modelo de otimização. O estudo sugere que através da combinação de técnicas de transferência de carga e de eficiência energética, uma economia de energia anual de 2540035 kW.h é possível, levando a uma economia anual de custos de 277.035 dólares (CHATTERJEE *et al.*, 2015).

Para finalizar, pode-se citar o artigo em que Keith *et al.* (2015) chamam a atenção para a evolução que a prática da engenharia de ventilação de mina vem experimentando com os novos avanços tecnológicos desenvolvidos na indústria de mineração. Nos últimos anos, os avanços em tecnologias de motores a diesel, software de modelagem de ventilação, e as capacidades de gestão de ventilação têm redefinido os métodos históricos utilizados para avaliar sistemas.

Avanços significativos em estratégias de controle de ventilação através de sensores remotos e capacidades de monitoramento foram desenvolvidos para os resultados em economia de custos.

Embora tendo havido muito avanço na tecnologia de ventilação de minas, as práticas e os princípios básicos de ventilação promovidos pelo engenheiro de ventilação não podem ser aplicadas com apenas avanços tecnológicos (KEITH *et al.*, 2015).

**CAPÍTULO 4**  
**METODOLOGIA**

## **CAPÍTULO 4**

### **4. METODOLOGIA**

Conforme já citado no capítulo 1, o campo para aplicação dos diversos tipos de análise, previstos nesta pesquisa, é a Mina Ipueira da Companhia Ferro Ligas da Bahia – FERBASA. Antes de serem abordadas as características do sistema de ventilação da mina, objeto principal da pesquisa, serão vistos alguns aspectos gerais e operacionais da mina Ipueira. Uma visão desses aspectos facilitará um melhor entendimento da metodologia aplicada na pesquisa.

#### **4.1 Aspectos geológicos**

O distrito cromitífero do Vale do Jacurici, no qual está situada a mina Ipueira, situa-se a leste da serra de Itiúba, margeando o rio Jacurici, possuindo cerca de 70 km de comprimento por 20 km de largura.

No Vale do Jacurici, os depósitos cromitíferos estão hospedados em um sill máfico-ultramáfico, interposto na sequência supracrustal, no qual estão situados os principais depósitos de Ipueira. As rochas desse sill e as encaixantes encontram-se dobradas em uma sinforme, com plano axial quase vertical e eixo ondulado caindo cerca de 20° a 30° para sul, definindo uma sucessão de domos e bacias bastante estiradas. Também existe a presença de uma foliação paralela ao acamamento, e como esta, também dobrada (DEUS e VIANA, 1982).

O Complexo do Vale do Jacurici possui 15 minas, espalhadas pelos municípios de Queimadas, Itiúba, Cansanção, Andorinha, Monte Santo e Uauá. A Figura 4.1 mostra as minas e outros empreendimentos da FERBASA.

O sill de Ipueira é uma intrusão simples formada principalmente por Dunito, Harzburgito e Piroxenito, que tecnicamente é chamado na FERBASA como Serpentinito. De acordo com Deus e Viana (1982), uma característica marcante dos corpos cromitíferos, são seus contatos muito bruscos com as rochas hospedeiras, havendo por outro lado, pouquíssimo minério disseminado.



Figura 4.1 - Minas e outros empreendimentos do grupo FERBASA.

## 4.2 Layout da mina Ipueira

A mina Ipueira atualmente é composta de seis painéis de desenvolvimento e lavra, dispostos longitudinalmente na direção Norte-Sul, que recebem a denominação de Ipueira II, III, IV, VA, VB e VIA. Esses painéis apresentam uma extensão de aproximadamente 500 m cada, resultando, portanto, numa extensão total da mina de aproximadamente 3 km. Os diversos níveis de produção são caracterizados por suas profundidades em relação à superfície, tendo seus níveis mais profundos, atingido a profundidade aproximada de 450 m.

O acesso ao interior da mina é feito por duas rampas principais, localizadas nos painéis de Ipueira II e Ipueira VA respectivamente. Atualmente, todos os painéis encontram-se interligados. As Figura 4.2 e 4.3 correspondem a duas vistas completas da mina Ipueira.

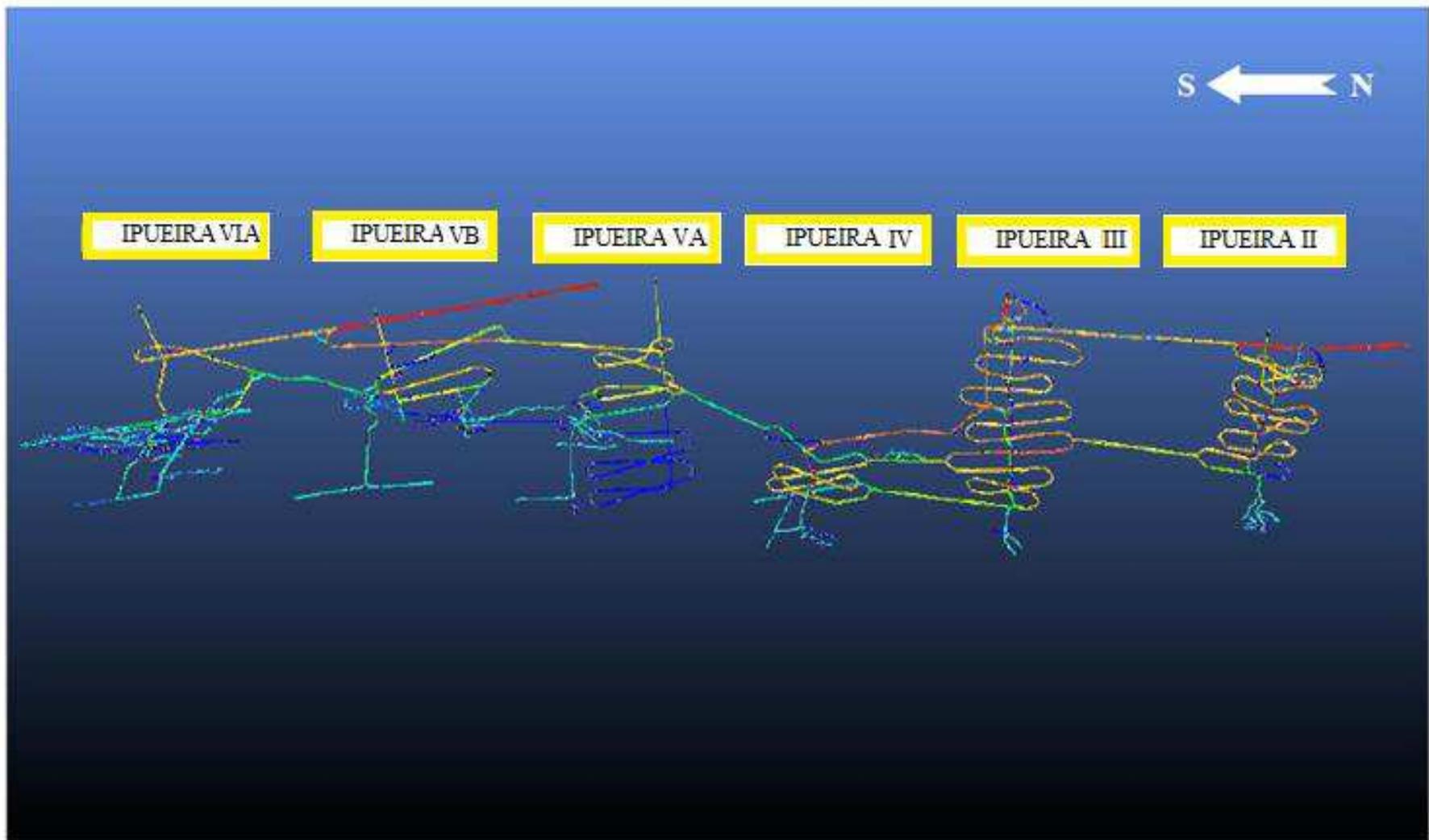


Figura 4.2 - Vista completa dos seis painéis da mina Ipueira.

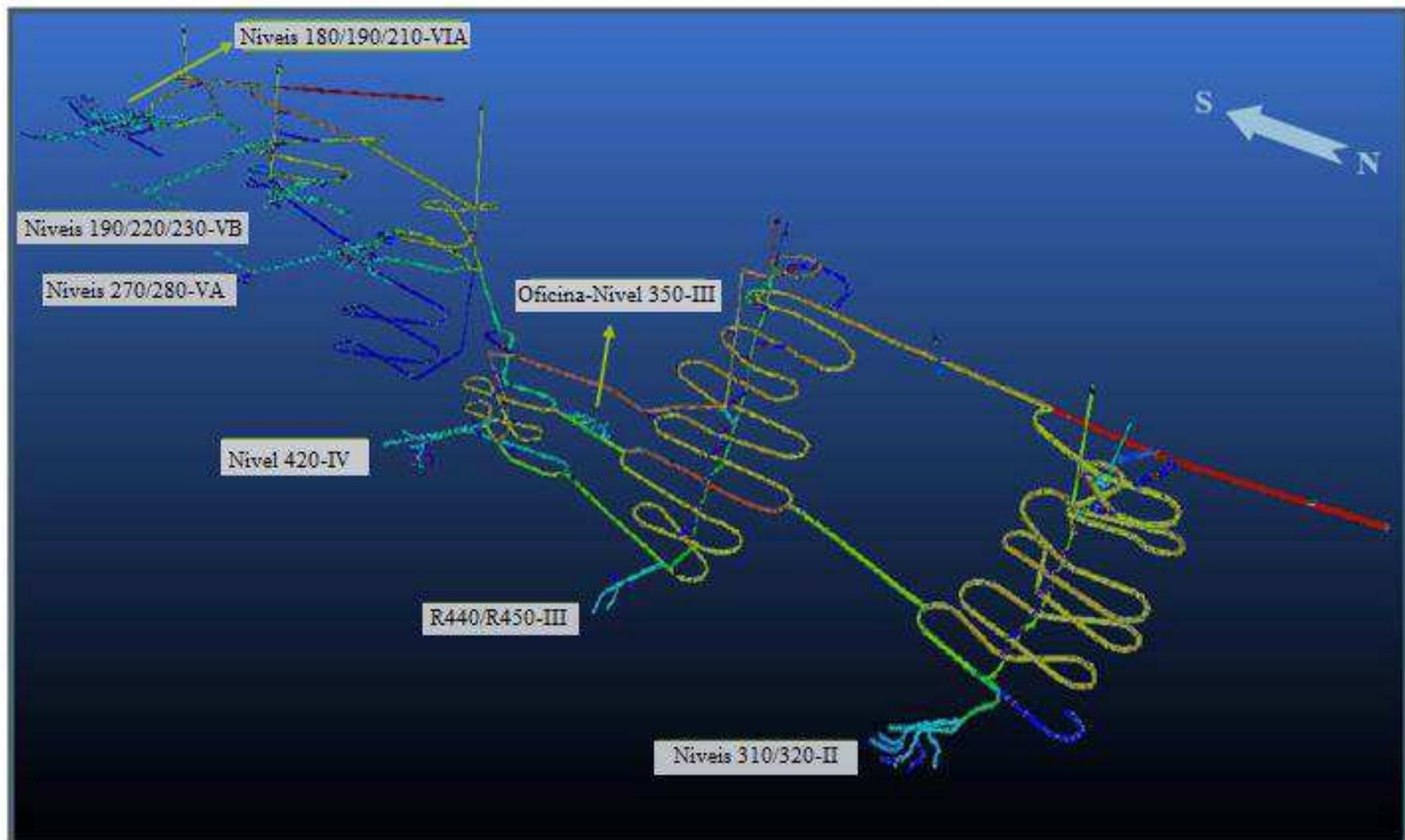


Figura 4.3 - Rampas e níveis da mina Ipueira.

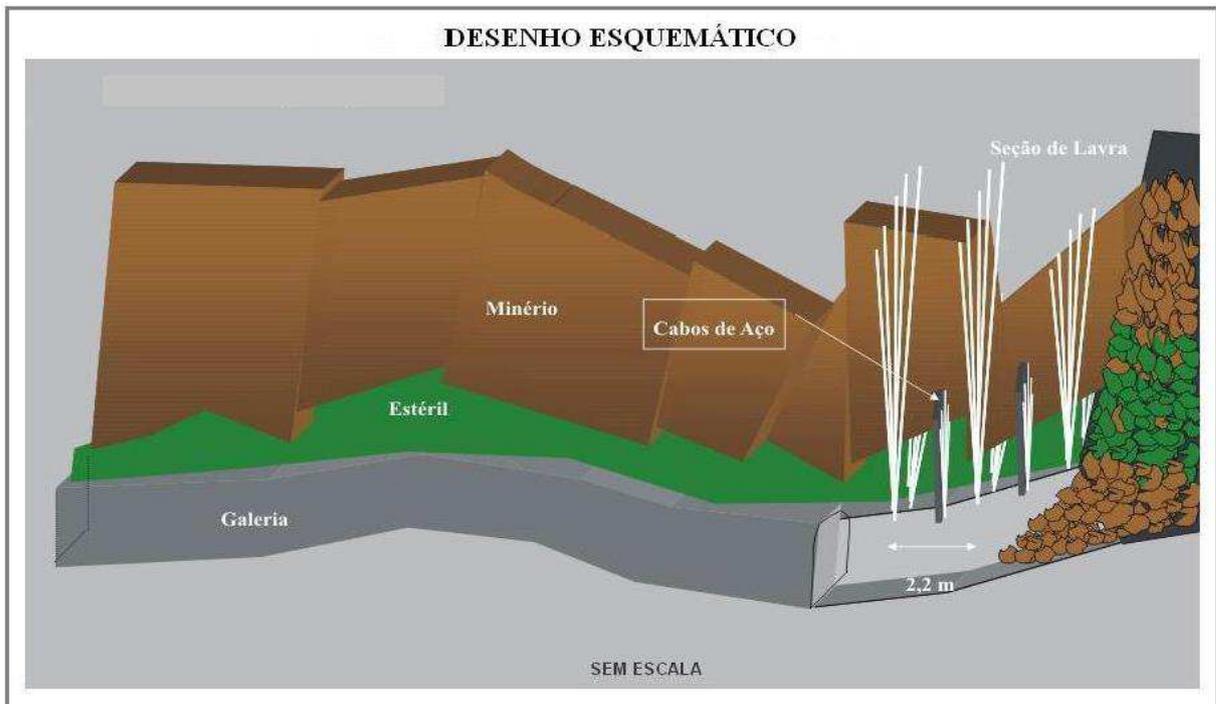
### **4.3 Métodos de lavra adotados na mina Ipueira**

Lima *et al.* (2008) apresentaram os métodos de lavra utilizados na mina Ipueira e as alterações sofridas por eles em conformidade com a disposição dos corpos mineralizados no que diz respeito à sua inclinação. O método de abatimento longitudinal por subníveis (*sublevel caving*), praticado em corpos com mergulho acentuado, evoluiu para o método realces abertos em recuo (*retreating open stopes*) para corpos sub-horizontais, inicialmente com desenvolvimento no estéril, e posteriormente com desenvolvimento no interior do corpo de minério. Os resultados da lavra em escala piloto, na qual as galerias foram desenvolvidas no interior do corpo de minério, foram apresentados, com ênfase para os aspectos de diluição e recuperação.

#### **4.3.1 Conceitos básicos sobre diluição na lavra**

A diluição consiste na fração de estéril que está contida na rocha extraída (minério mais estéril) por meio das operações de lavra (TAPP, 1982). Uma parcela da diluição é gerada na fase de desmonte, com a incorporação compulsória de estéril nos leques de detonação (Figura 4.4), sendo essa parcela inerente às características de cada jazida e aos métodos de lavra adotados. Essa forma de diluição somente pode ser diminuída por intermédio de um melhor posicionamento das galerias de produção, ou por mudanças no método de lavra.

A diluição gerada no desmonte pode ser calculada se forem conhecidos os teores e massas de minério e de estéril contidas nos leques de detonação. Essa diluição é denominada de diluição planejada (HENNING e MITRI, 2008). A outra parcela de diluição resulta da ruptura, com subsequente queda e deslizamento, das rochas encaixantes dos tetos e das laterais, para dentro dos realces de lavra. Esse tipo de diluição pode ser minimizado reduzindo o tempo de carregamento do minério após o desmonte, ou utilizando cabos para estabilizar as paredes e os tetos dos realces. Essa diluição é denominada de diluição não-planejada (HENNING e MITRI, 2008).



**Figura 4.4 - Esboço do método de lavra de abatimento por subníveis, com detalhes dos leques de detonação ou seções de lavra (ALVES, 2005).**

Das duas formas mais utilizadas para expressar numericamente a diluição, uma relaciona a massa de estéril com a massa de minério, a outra estabelece a relação entre a massa de estéril e a soma das massas de estéril e minério, ambas expressas em percentagem (HENNING e MITRI, 2008). A segunda forma, que é adotada nas planilhas de cálculo de diluição planejada nas minas da FERBASA, é expressa da seguinte forma:

$$\text{Diluição Planejada} = 100 \times \frac{\text{Massa de estéril desmontado}}{\text{Massa de estéril desmontado} + \text{Massa de minério desmontado}} \quad (4.1)$$

A soma da massa de estéril com a massa de minério que é extraída do subsolo por meio das operações de lavra pode ser designada como massa total, ou também como ROM (*run of mine*). A diluição calculada com base no ROM, ou diluição total, incorpora os efeitos da diluição planejada e da diluição não-planejada (LIMA et al., 2008).

#### 4.3.2 Conceito de recuperação

No contexto de lavra de mina, ainda de acordo com Lima et al. (2008), outro índice muito importante a ser avaliado é a recuperação, que consiste na percentagem de minério que

é extraída na lavra, em relação às reservas presentes em determinado setor de uma jazida. De acordo com Baase *et al.* (1982), a recuperação pode ser expressa como:

$$\text{Recuperação} = 100 \times \frac{\text{Massa de minério extraído}}{\text{Massa de minério desmontado}} \quad (4.2)$$

Cada método de lavra é concebido com uma faixa de variação aceitável de recuperação e de diluição. A escolha e o desenvolvimento de um determinado método de lavra é tanto melhor quanto menor for a diluição e maior for a recuperação. O aumento da diluição, ou a redução da recuperação, afetam substancialmente a economicidade dos empreendimentos minerais. Algumas ações tomadas para aumentar a recuperação podem acarretar um aumento da diluição, e vice-versa, a tentativa de reduzir a diluição pode reduzir também a recuperação (TAPP, 1982).

#### **4.3.3 Método de lavra modificado**

De acordo com Lima *et al.* (2008), diante da necessidade de reduzir a diluição, teve início a aplicação de um método para lavar os corpos horizontalizados que pudesse vir a substituir eficazmente o método realces abertos com desenvolvimento no estéril, em uso até então.

Na comparação entre os modelos, com o desenvolvimento de galerias dentro do minério e com o de desenvolvimento de galerias no estéril, verifica-se de imediato a eliminação da diluição planejada que resulta da operação de desmonte com a adoção do novo método.

Além da eliminação da diluição no desmonte, como vantagens adicionais do desenvolvimento no minério, podem ser citadas as seguintes:

- a) Redução dos comprimentos dos furos e redução do consumo de explosivos.
- b) Redução da altura das faces livres a serem necessariamente abertas no início da lavra de cada galeria.
- c) Maior resistência à compressão dos pilares de minério, em relação aos pilares em gabro ou serpentinitos alterados.

Como desvantagens, ou dificuldades, antevistas para o método de lavra com desenvolvimento dentro do minério, podem ser citadas as seguintes:

- a) Necessidade de suporte e reforço adicional, com concreto projetado e cabos nos tetos e nas laterais, face à presença de juntas preenchidas com carbonatos no minério aumentando a possibilidade de formação de cunhas.
- b) Necessidade de redução do afastamento entre os leques de detonação, face à redução de altura, para preservar uma relação entre a altura dos leques e afastamento que seja favorável.
- d) Devido à frequente presença de falhas que rejeitam os blocos de minério para diferentes cotas, existe maior dificuldade de locação das galerias satisfazendo a condição de que o minério não fique abaixo do piso, sem possibilidades de recuperação.

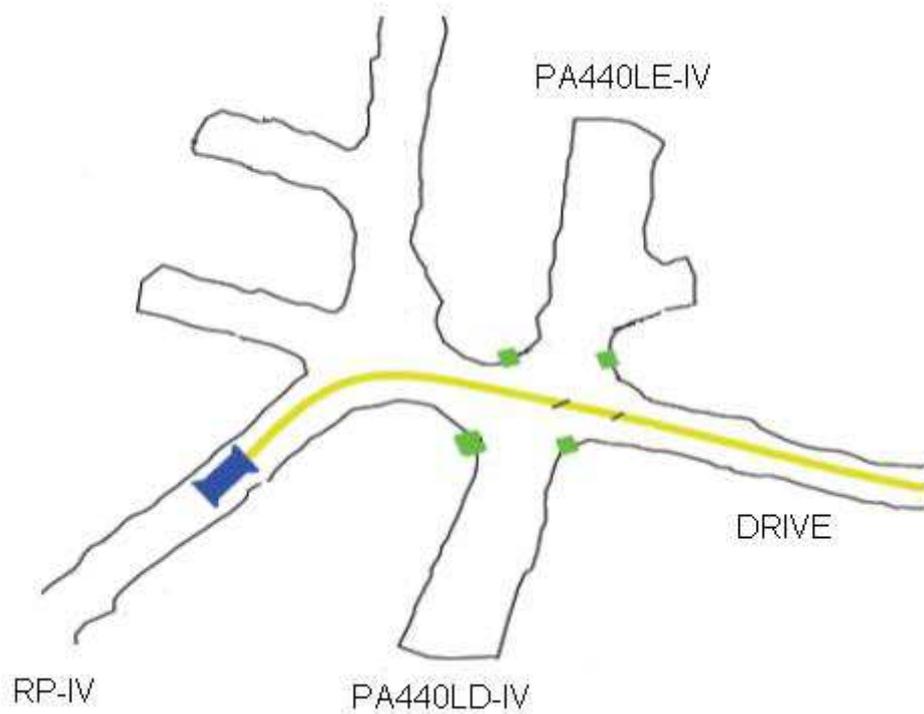
#### **4.4 Tipos de aberturas da mina Ipueira**

Na execução das vias de acesso, pesquisa, desenvolvimento, lavra e transporte de minério na mina Ipueira, três principais tipos de abertura se destacam:

- a) Rampa Principa (RP), com secção transversal de 4,7 m x 5,0 m;
- b) Galeria de Pesquisa (GP), com secção transversal de 3,5 m x 4,2 m;
- c) Galeria de Lavra (DRIVE), com secção transversal de 4,0 m x 4,2 m.

Outro tipo de abertura, chamada de Rampa de Acesso, liga a rampa principal às galerias de produção e apresentam as mesmas dimensões da rampa principal antes de realces denominados Pontos de Apoio (PA), apresentando, após esses realces, as dimensões das galerias de produção.

Os equipamentos de perfuração, utilizados na construção dessas aberturas, são o Jumbo, utilizados em operações de desenvolvimento da mina, e o Fundrill, utilizados nas operações de lavra. A Figura 4.5 ilustra os tipos de abertura da mina Ipueira.



**Figura 4.5 - Croqui esquemático das principais aberturas da mina Ipueira.**

#### **4.5 Carregamento e transporte**

O material desmontado é retirado das galerias de lavra ou desenvolvimento por meio de carregadeiras rebaixadas (LHD), com capacidade de 14 toneladas, e levado até os PA's (Pontos de Apoio). Nos PA's, carregadeiras de 10 toneladas abastecem os caminhões que, por sua vez, transportam o material até a superfície. São utilizados caminhões rodoviários SCANIA com capacidade de 37 toneladas, além de caminhões fora de estrada RK.

#### **4.6 Características gerais do sistema de ventilação**

O sistema de ventilação principal das minas de Ipueira II, III, IV, VA, VB e VIA é por exaustão, onde o ar é introduzido através das rampas principais devido à diferença de pressão criada por ventiladores, instalados nas chaminés de ventilação na superfície.

Para que o ar que percorre as rampas principais chegue às frentes de serviço, é utilizada a ventilação secundária, realizada em circuito paralelo com a ventilação principal. Para essa atividade utilizam-se ventiladores posicionados na rampa principal.

O cálculo da vazão requerida para as atividades em subsolo foram baseadas no número máximo de máquinas de combustão à óleo diesel. Este cálculo permitiu aos projetistas, dimensionar a ventilação para atender às necessidades da mina.

Devido ao estabelecido pela empresa fornecedora de energia elétrica, a Coelba, a empresa Ferbasa trabalha em dois períodos de horários distintos: o período de “horário normal” e o de “horário de ponta”. Esses períodos são caracterizados de acordo com a quantidade de trabalhadores presentes e equipamentos em funcionamento. No período correspondente ao “horário normal”, essa quantidade de trabalhadores e equipamentos é maior, demandando, portanto, maior quantidade de ar, exigindo conseqüentemente que os ventiladores trabalhem com rotação maior, o que implica em maior potência de trabalho.

Por sua vez, nos intervalos de turno e no período correspondente ao “horário de ponta”, os ventiladores são programados para funcionar com rotações menores, em função da menor intensidade das atividades nesse período. Uma menor vazão requerida nos citados períodos, resultando em uma menor potência de trabalho, atende a finalidade de economizar energia, tendo em vista que a empresa contrata uma determinada demanda que, caso seja ultrapassada, implica na aplicação de multa.

#### **4.6.1 Ventilação principal**

A ventilação principal é constituída por ventiladores de exaustão em paralelo, localizados, 2 a 2, nas chaminés das minas de Ipueira II, III, VA, VB e VIA.

A mina Ipueira, formada pelos seis painéis interligados, possui duas entradas principais de ar (rampas principais), que estão localizadas nas minas de Ipueira II e V, além de algumas chaminés de entrada de ar. Assim o ar que entra na mina de Ipueira II faz a ventilação da mesma e a da mina de Ipueira III, sendo a exaustão efetuada nas respectivas chaminés (chaminés de exaustão ou saída de ar). Já o ar inserido na mina de Ipueira V, serve para fazer a ventilação das minas de Ipueira IV, V e VI.

A Figura 4.6 mostra os dois ventiladores da chaminé de Ipueira II.



Figura 4.6 - Ventiladores de exaustão da mina de Ipueira II.

A Figura 4.7 mostra a representação esquemática do comportamento do fluxo de ar na mina Ipueira.

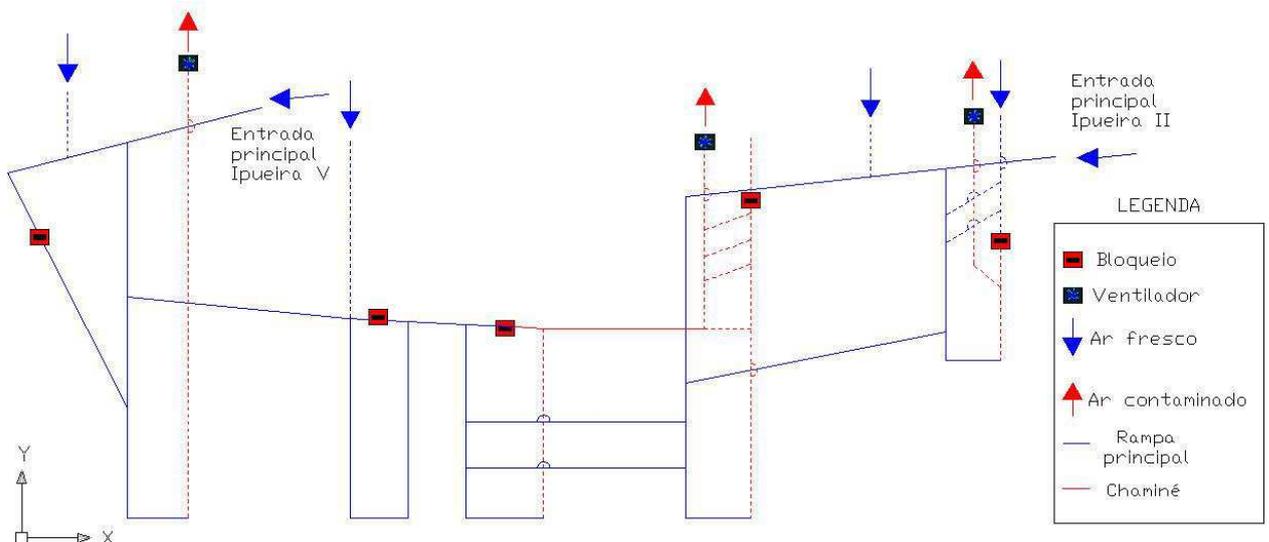


Figura 4.7 - Diagrama do comportamento do fluxo na mina Ipueira  
(Fonte: FERBASA, 1998).

Atualmente todos os ventiladores principais da mina Ipueira estão automatizados, sendo comandados a partir de uma central de comando na superfície. Os ventiladores são acionados por chaves de partida inversoras de frequência, possibilitando o ajuste da velocidade de rotação de acordo com a demanda, permitindo uma economia no consumo de energia elétrica. A Tabela 4.1 contém a relação dos ventiladores principais e a Figura 4.8 é um diagrama esquemático do circuito de ventilação principal da mina Ipueira, ainda sem os ventiladores de Ipueira VIA, posteriormente instalados.

**Tabela 4.1 - Distribuição e principais características dos ventiladores principais da mina Ipueira**  
(Fonte: FERBASA, 2014).

Mina/ Parâmetros	Ipueira II		Ipueira III		Ipueira VA		Ipueira VB		Ipueira VIA	
-	VT50	VT51	VT36	VT37	VT63	VT64	VT61	VT62	VT41	VT42
<b>Velocidade</b>										
<b>Angular</b> (rpm)	1785	1785	1195	1195	1785	1785	1785	1785	1785	1785
<b>Vazão (m³/s)</b>	45	45	50	50	50	50	50	50	50	50
<b>Pressão</b>										
<b>Estática</b> (mmCA)*	272	272	423	423	295	295	295	295	295	295
<b>Potência</b> (CV)**	250	250	400	400	250	250	250	250	250	250

\* 1 mmCA = 9,8 Pa

\*\*1 CV = 735,49875 W

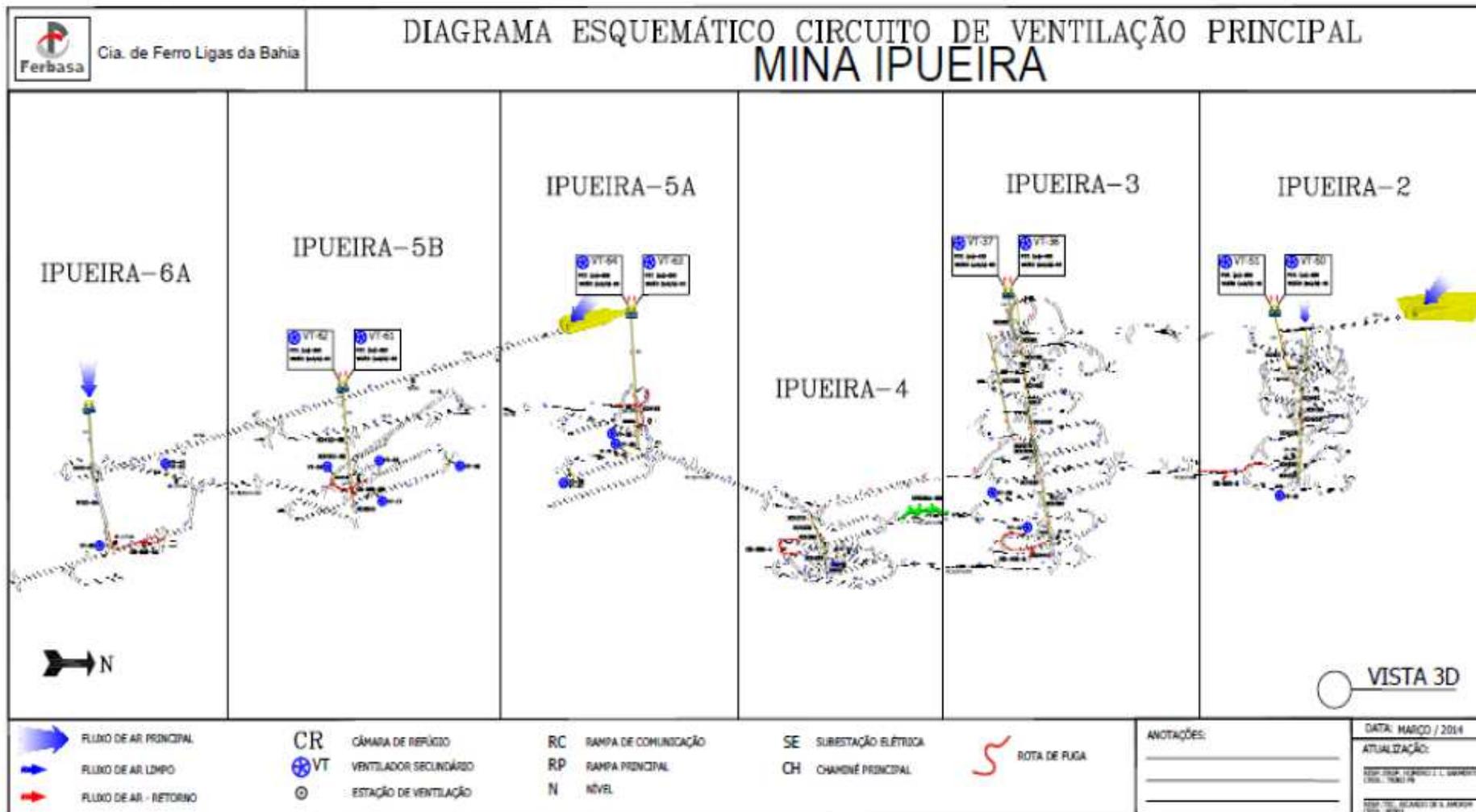


Figura 4.8 - Circuito de ventilação principal da mina Ipueira (Fonte: FERBASA, 2014).

#### 4.6.2 Ventilação secundária

As frentes de serviços são ventiladas através de circuitos paralelos ao da ventilação principal, utilizando-se ventiladores axiais posicionados na rampa principal e acoplados a dutos de vinilona. O retorno do ar viciado dessas frentes é feito através das galerias.

Os ventiladores secundários são instalados no teto da rampa principal. Devido ao dimensionamento dos equipamentos que trafegam na rampa, o diâmetro máximo estabelecido para os ventiladores é de 1200 mm., além de se providenciar uma elevação do teto no local de instalação, com a finalidade de protegê-lo de avarias. Os dutos de vinilona apresentam diâmetros de 700 mm e 1000 mm, utilizando-se também, dutos geminados com perfil mais baixo. A Figura 4.9 ilustra um ventilador secundário (direita) instalado no teto da rampa principal e dutos que levam o fluxo de ar até às frentes de serviço (esquerda).



**Figura 4.9 - Ventilador secundário e dutos de ventilação.**

No momento, o sistema de ventilação secundário apresenta maior consumo de energia que o sistema principal. Com o objetivo de reverter esta situação, torna-se necessário a tomada de ações que visem a modernização do sistema, entra as quais, a substituição de chaves de partida do tipo soft-starter por chaves do tipo inversores de frequência. Por serem controlados, em sua maioria, por painéis com chaves “soft-starter”, que não permitem o ajuste da velocidade de rotação, ou por operarem em estado de sobrecarga, grande parte dos ventiladores secundários operam com rotação máxima.

#### **4.7 Pesquisa para implantação da automação na ventilação secundária**

Após a implantação total em 2013, pela FERBASA, de um projeto de automação para a ventilação principal das minas de Ipueira, iniciado e desenvolvido em torno de três anos antes, a empresa pode constatar uma redução considerável do consumo de energia do seu sistema de ventilação. A obtenção desta redução (em torno de 68%) tornou a FERBASA uma referência dentre as empresas de mineração que operam com minas subterrâneas.

O êxito obtido com a automação da ventilação principal tornou-se um incentivo para que a empresa pudesse enfrentar um novo desafio que era o de realizar investimentos no desenvolvimento de um projeto mais ousado e complexo. Este novo projeto, que pretende implantar o máximo de automação no sistema de ventilação secundária tem o objetivo de caracterizar o sistema de ventilação do complexo Ipueira como um sistema, realmente, de “ventilação sob demanda”

Então, a partir da segunda metade do ano de 2014, como parte da programação da presente pesquisa, foi feito um pormenorizado levantamento de todo o sistema de ventilação da mina Ipueira. Esse levantamento incluiu o cálculo de fluxos de ar requeridos pela mina, em função dos diversos parâmetros determinantes dos valores das vazões demandadas, para o atendimento das normas de segurança estabelecidas. Consequentemente, tornou-se necessário avaliar, entre outros fatores, concentrações de gases oriundos do consumo de explosivos, bem como os resultantes da combustão interna dos motores a diesel dos diversos tipos de equipamento utilizados em subsolo.

Foi também alvo desta fase da pesquisa a composição de um diagnóstico do consumo de energia do sistema de ventilação existente. Para tal foi necessário um levantamento de todos os ventiladores principais e secundários, distribuídos, respectivamente, na superfície e subsolo da mina, com o objetivo principal de determinar a potência instalada do sistema.

A Tabela 4.2 mostra a distribuição e características dos ventiladores secundários da mina Ipueira.

Tabela 4.2 - Distribuição e características dos ventiladores secundários da mina Ipueira (Fonte: FERBASA, 2014).

<b>Mina/ Parâmetros</b>	<b>Ipueira II</b>	<b>Ipueira III</b>	<b>Ipueira IV</b>	<b>Ipueira VA</b>			<b>Ipueira VB</b>			<b>Ipueira VIA</b>					
-	VT34	VT59	VT53	VT29	VT32	VT38	VT57	VT65	VT54	VT58	VT45	VT17	VT60	VT52	VT40
<b>Velocidade Angular (rpm)</b>	1780	1780	1780	1780	1780	1780	1775	1775	1780	1780	1780	1775	1780	1780	1780
<b>Vazão (m<sup>3</sup>/s)</b>	18	16	20	18	18	-	20	-	18	20	-	-	16	20	20
<b>Pressão Estática (mmCA)</b>	356	310	362	-	356	-	-	-	356	-	-	-	310	356	362
<b>Potência (CV)</b>	125	100	125	125	125	125	75	75	125	125	125	75	100	125	125

\* 1 mmCA = 9,8 Pa

\*\*1 CV = 735,49875 W

#### 4.8 Quantificação das horas de operação dos ventiladores secundários

Como primeiro passo, para a realização do levantamento, buscou-se definir o horário de trabalho dos ventiladores secundários, e a quantificação das horas em que o ventilador passa teoricamente desligado. Esses horários foram estabelecidos após a empresa fornecedora de energia anunciar o lançamento de novo horário de ponta. A partir desse anúncio, os horários dos turnos foram refeitos e conseqüentemente a programação de funcionamento dos ventiladores. Os dados relativos aos intervalos de funcionamento estão mostrados na Tabela 4. 3. Na segunda feira os ventiladores secundários são acionados às 05:00 hs, sendo que os demais horários seguem os estabelecidos para toda a semana. Aos sábados, apesar de não existir horário de ponta (segunda à sexta-feira das 18:00 às 21:00 hs), o funcionamento dos ventiladores secundários seguem a mesma programação. Aos domingos, os ventiladores são desligados a partir de 02:30 hs, permanecendo assim até as 05:00 hs da manhã de segunda feira, reiniciando assim o ciclo semanal.

Tabela 4. 3 - Quadro de horário dos ventiladores secundários (Fonte: FERBASA, 2014).

Horário		Estado do ventilador
02:30	04:30	DESLIGADO
04:30	10:30	LIGADO
10:30	12:00	DESLIGADO
12:00	17:50	LIGADO
17:50	21:10	DESLIGADO
21:10	02:30	LIGADO

#### 4.9 Quantidade de ar fresco requerida pela mina

A determinação da quantidade de ar necessária para ventilar uma mina deve atender aos requisitos impostos pela legislação vigente, relativa à Segurança e Saúde Ocupacional dos Trabalhadores. Para o caso de específico da vazão de ar mínima necessária, a determinação deve estar de acordo com o tópico NR 22.24.8 da Norma Regulamentador 22, do Ministério do Trabalho e Emprego, estabelecida pela Portaria nº 3.214/78. O cálculo da vazão mínima necessária, conforme preconiza a Norma, deve ser efetuado de três maneiras, em função dos fatores que influenciam na quantidade de ar demandada. Esses fatores são: a) potência dos

equipamentos a diesel em operação e número de colaboradores; b) tonelagem mensal desmontada e c) quantidade de explosivo utilizada nos desmontes. O maior valor encontrado nas três formas de cálculo deverá ser a vazão requerida considerada.

#### 4.9.1 Vazão requerida em função dos equipamentos e número de colaboradores

A fórmula estabelecida pela NR 22 para a determinação da vazão requerida em função dos equipamentos a diesel e número de colaboradores é expressa como

$$Q_{e,p} = q_p \cdot N_p + q_w \cdot W_e \quad (4.1)$$

onde  $Q_{e,p}$  = vazão total de ar em função dos equipamentos e pessoas, em m<sup>3</sup>/min.

$q_p$  = vazão de ar por pessoa, em m<sup>3</sup>/min.

$N_p$  = número de pessoas no turno de trabalho

$q_w$  = vazão de ar por unidade de potência, em m<sup>3</sup>/min.

$W_e$  = potência total dos motores dos equipamentos a óleo diesel

O cálculo em função dos equipamentos a diesel exigiu a coleta de uma série de dados referentes à frota das minas Ipueira, incluindo a cronometragem do tempo de permanência em subsolo de alguns equipamentos, a exemplo de caminhões, que operam dentro e fora da mina.

Com os dados da frota de veículos e outros equipamentos a diesel, utilizados nas operações de subsolo da mina Ipueira, foi possível efetuar o cálculo para a determinação da vazão requerida. Um fator de dificuldade muito grande na coleta dos dados necessários ao referido cálculo é a determinação do tempo de operação efetivo, em subsolo, destes equipamentos. Para tal, se torna necessário cronometrar todo o ciclo de operação dos equipamentos, durante o turno, para possibilitar esta determinação. Naturalmente, como existem variações nos ciclos de operação dos equipamentos, principalmente os que operam em superfície e subsolo (caminhões e outros veículos), as cronometragens devem abranger vários turnos para que possa se chegar a valores, o mais próximo possível do real, desse tempo de operação.

#### **4.9.2 Vazão requerida em função da tonelagem mensal desmontada**

A fórmula estabelecida pela NR 22 para a determinação da vazão requerida em função da tonelagem mensal desmontada é expressa como

$$Q_T = q_t \times T, \quad (4.2)$$

onde

$Q_T$  = vazão total de ar fresco em função da tonelagem desmontada, em m<sup>3</sup>/min.

$q_t$  = vazão de ar fresco para 1.000 toneladas desmontadas por mês, em m<sup>3</sup>/min (mínimo de 180 m<sup>3</sup>/min/1.000 toneladas mensais desmontadas).

$T$  = produção mensal em toneladas desmontadas.

#### **4.10 Controle da vazão nas frentes de serviço com o uso de sensores.**

Como parte da pesquisa para implantação de ventilação sob demanda, em função de aspectos ambientais, no decorrer dos últimos dois anos estão sendo feitos testes com sensores de detecção de monóxido de carbono (CO). Atualmente estão em operação quatro sensores, que são instalados, conjuntamente, em locais específicos de um Ponto de Apoio (PA) da rampa principal da mina Ipueira. Esses sensores são ligados aos ventiladores auxiliares responsáveis pela ventilação das frentes de serviço ligadas ao ponto de apoio escolhido, com o principal objetivo de regular a ventilação secundária nestes locais. O funcionamento automatizado dos ventiladores responsáveis por esta ventilação secundária, que independem da intervenção humana, torna-se possível com a instalação dos sensores ligados a um equipamento elétrico digital conhecido como CLP (Controle Lógico Programável). Esses testes servem de modelo para a regulação da vazão em função de outros agentes nocivos.

#### **4.11 Mapeamento do sistema de ventilação secundária das minas Ipueira**

Como ponto de partida para a obtenção de uma melhoria do sistema de ventilação, tanto em termos de quantidade e qualidade do fornecimento de ar para as frentes de serviço, como em termos da adoção de medidas para a diminuição do consumo de energia, foi realizado um mapeamento de toda a ventilação secundária. Esse mapeamento incluiu um levantamento, galeria por galeria, de todos os elementos importantes para o sistema secundário, tais como:

quantidade, situação e estado de conservação dos dutos de ventilação; características dos ventiladores; tipos de chave de partida; galerias de abrangência de cada ventilador; cálculo de vazão com verificação da qualidade do ar em cada frente de serviço. Tal levantamento não dispensou seções de diálogos com os trabalhadores das frentes de serviço, para o conhecimento de suas necessidades e reivindicações a respeito da ventilação.

Como metodologia para a coleta de dados, para composição do diagnóstico do sistema de ventilação secundária, foram elaborados croquis representativos de todos os setores de ventilação secundária, que incluíam cada galeria do setor, quantidade de dutos, potência do ventilador, etc. A Figura 4.10 mostra o croqui representativo da ventilação secundária do nível 420 da mina Ipueira IV.

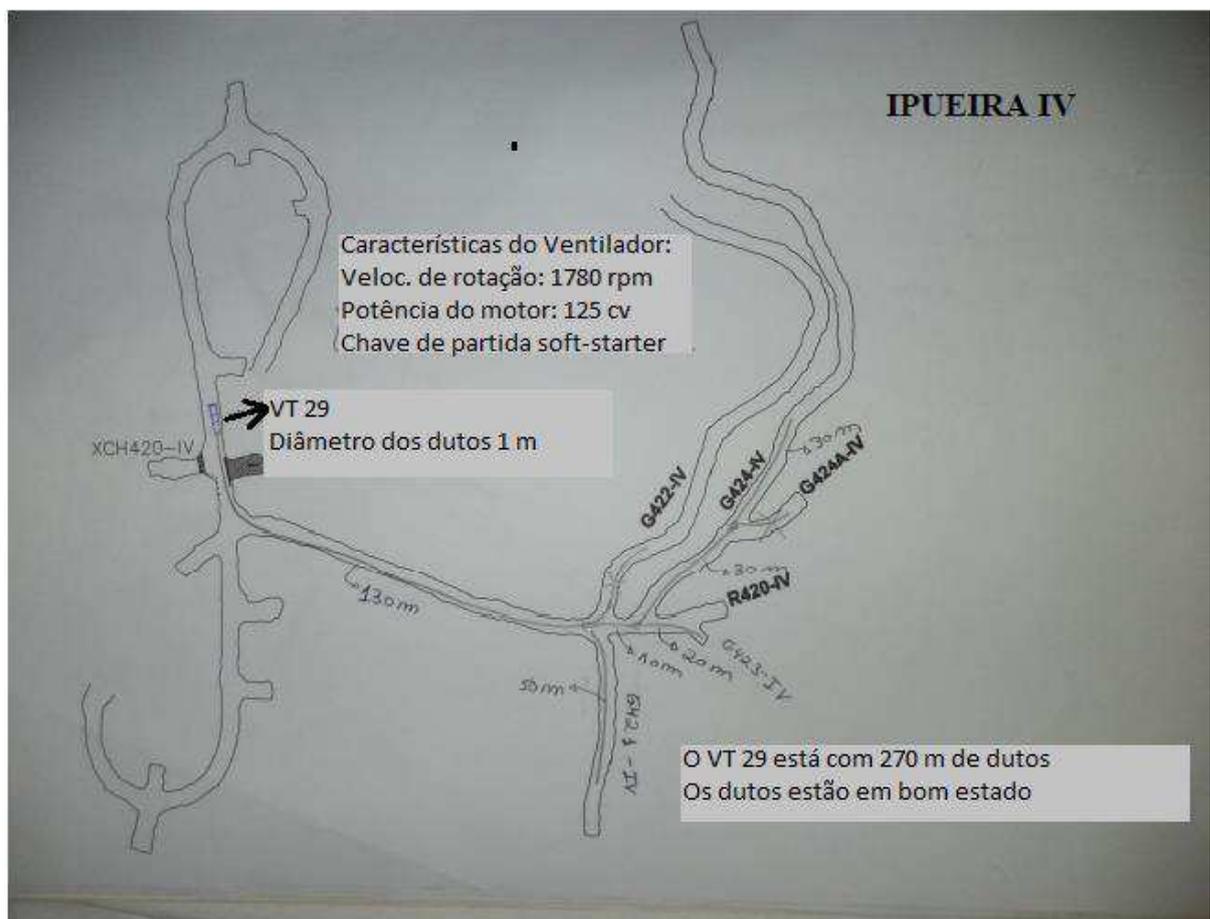


Figura 4.10 - Croqui do nível 420 Ipueira IV (Fonte: FERBASA, 2014).

#### **4.12 Análise de custos do sistema de ventilação da mina Ipueira**

As medidas das horas trabalhadas (fornecidas pelos horímetros) e das potências de trabalho de cada ventilador secundário fornecem o seu consumo mensal de energia (kW. h). Com os dados de consumo horário dos ventiladores sendo conhecidos, combinados com a quantidade de ar que entra na mina por hora, obtida pela determinação das vazões nas estações de ventilação, torna-se possível conhecer o custo específico do ar fornecido pelo sistema de ventilação. Também, a partir dos dados obtidos do levantamento da ventilação secundária, foi possível determinar o consumo mensal de energia elétrica (kW.h) de cada ventilador secundário. Com base nas tarifas pagas pela FERBASA, nos horários normal e de ponta, também pode se determinar o custo mensal (em reais) do consumo de energia elétrica do sistema de ventilação.

#### **4.13 Análise da ventilação secundária com o uso do Ventsim**

Todos os dados obtidos durante a etapa de levantamento da ventilação secundária foram introduzidos no Ventsim, que até então estava atualizado apenas com dados do circuito principal, não sendo, portanto, utilizado para verificações do comportamento do fluxo de ar nos níveis das frentes de serviço. Esta atualização foi de grande valia, uma vez que, a partir desta fase da pesquisa, puderam ser executadas diversas simulações, com o objetivo de se encontrar as melhores soluções para determinadas situações. A atualização do sistema de ventilação secundária no Ventsim seguiu as etapas abaixo descritas:

- a) Mapeamento de todos os níveis da mina que utilizam a ventilação secundária;
- b) Importação de todas as linhas dos níveis para o Ventsim em formato DXF, gerando o formato e dimensão mais próximos do real das galerias e rampas;
- c) Cadastramento de todos os modelos de ventiladores em operação nas minas por meio de preenchimento de planilha com dados de pressão total, pressão estática, vazão e eficiência;
- d) Implantação dos ventiladores e dutos de ventilação (700 mm ou 1000 mm de diâmetro).

A partir de dados do cronograma de desenvolvimento e produção da mina Ipueira, fornecido pela equipe de planejamento da empresa, procedeu-se uma estimativa da necessidade de ventilação para os próximos meses e anos. Este cronograma estabelece, entre outras ações, as aberturas que serão realizadas como também a previsão das galerias que estarão em desenvolvimento, que necessitam de avanço de dutos, e as que estarão em fase de lavra, que necessitam de recuo de dutos. Desses dados dependerão os ajustes das velocidades de rotação dos ventiladores.

#### **4.14 Análise da ventilação principal por simulações**

Apesar do sistema de ventilação principal encontrar-se automatizado e monitorado, à época desta pesquisa, e do conhecimento do fato de que houve uma redução no consumo de energia elétrica proporcionado por esta automação, a busca por mais reduções desse consumo deve continuar. Partindo-se desta premissa, foi executada uma simulação no Ventsim de como se comportaria o sistema, caso fossem retirados os ventiladores do painel Ipueira II. Esta hipotética retirada dos ventiladores principais da chaminé de Ipueira II baseia-se no fato de que as atividades neste setor estão com previsão para serem encerradas em um futuro muito próximo, por esgotamento das reservas minerais no painel.

Foram executadas as simulações com os ventiladores em funcionamento normal e desligados (simulando a retirada dos mesmos), tomando-se o cuidado de se verificar a vazão de toda a mina e o consumo de energia elétrica baseado nas potências de funcionamento dos ventiladores, nos dois casos. Além das simulações no Ventsim, foram realizadas medições de vazão em campo, com os ventiladores de Ipueira II ligados e desligados, como forma de verificar a discrepância entre os valores simulados e medidos. Na Figura 4.11 estão indicados os cinco locais onde foram realizadas as medições de vazão.

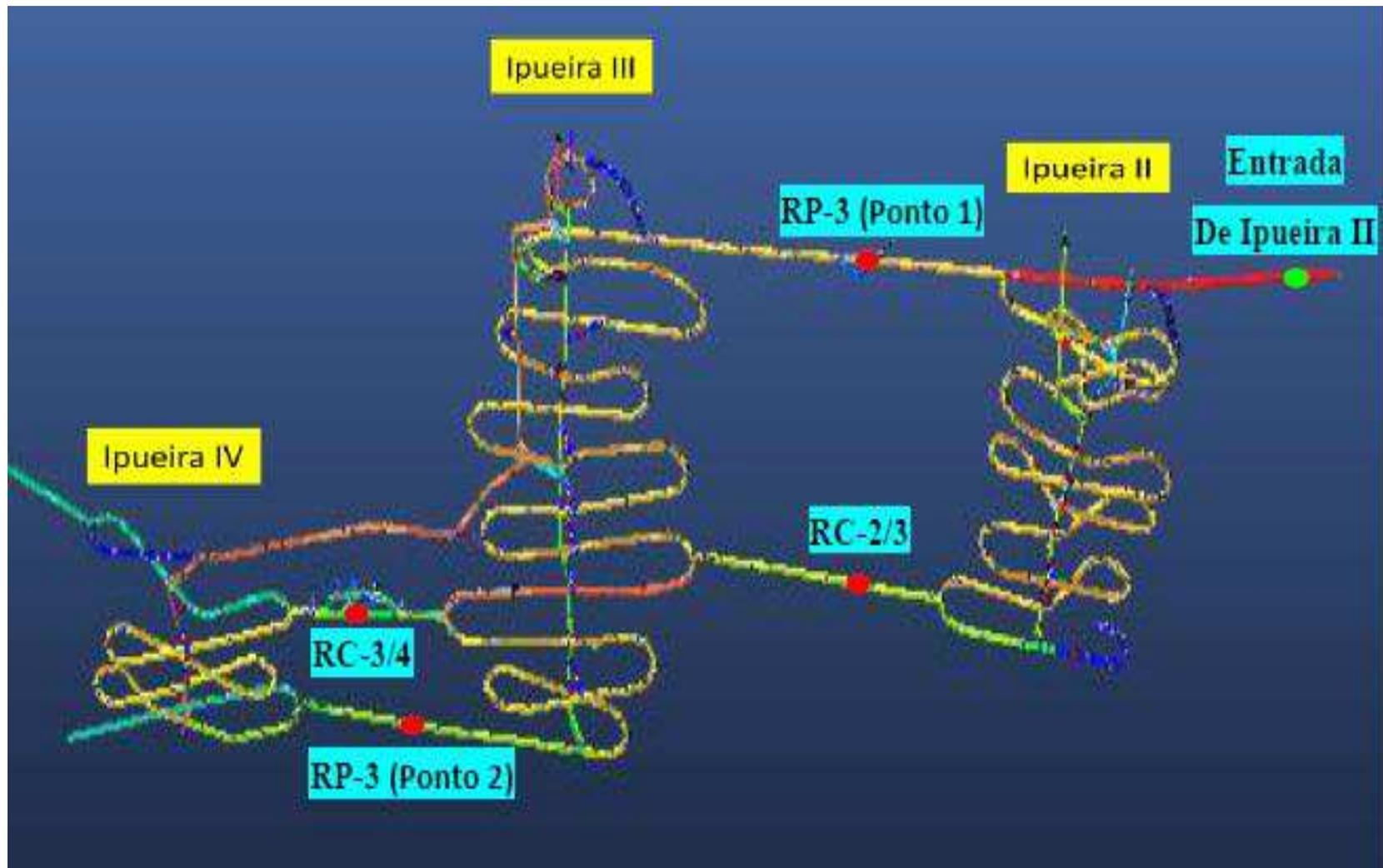


Figura 4.11 - Localização dos pontos de medição de vazão na mina.

**CAPÍTULO 5**  
**RESULTADOS E DISCUSSÃO**

## **CAPÍTULO 5**

### **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **5.1 Horas de operação dos ventiladores secundários**

Para o levantamento das horas efetivamente trabalhadas pelos ventiladores secundários, recorreu-se aos horários de funcionamento desses ventiladores, estabelecidos pela empresa, com o objetivo de melhor se adequar ao regime de diferentes taxas de energia, específicas para diferentes intervalos de horas.

As medições ao longo de 30 dias indicaram que em 88,4% do tempo total de funcionamento, os ventiladores secundários operam em período de horário normal, enquanto que em 11,6% do tempo total, eles operam em horário de ponta. Esse fato se torna importante tendo em vista que as tarifas são diferentes para os dois horários.

#### **5.2 Determinação da vazão requerida pela mina**

O cálculo da vazão necessária para atender ao que preconiza a legislação de segurança e saúde ocupacional, estabelecida pela NR-22, foi executado em conformidade com essa mesma Norma.

##### **5.2.1 Determinação em função dos equipamentos e número de colaboradores**

O cálculo da vazão, para cada equipamento em operação, foi obtido encontrando-se o produto dos seguintes parâmetros: a) vazão de 3,5 m<sup>3</sup>/min por unidade de potência; b) potência do motor do equipamento considerado e c) rendimento do equipamento (função do tempo de operação em subsolo). A vazão necessária para atender os trabalhadores envolvidos nas atividades em subsolo foi obtida do produto de 2 m<sup>3</sup>/min pelo número de trabalhadores.

A relação da frota de veículos e equipamentos da mina Ipueira, necessária ao cálculo da vazão requerida, é mostrada na Tabela 5. 1.

**Tabela 5. 1 - Lista da frota da Mina Ipueira e respectivas potências (Fonte: FERBASA, 2014).**

<b>Equipamentos</b>	<b>Quant.</b>	<b>Pot. motor (CV)</b>	<b>Equipamentos</b>	<b>Quant.</b>	<b>Pot. motor (CV)</b>
Caminhão 8x4 37 t	6	425	Caminhão 8x4 37 t	6	425
Carregadeira 10 t	1	325	Carregadeira 10 t	1	325
LHD 14 t	3	335	LHD 14 t	3	335
Caminhão 6x4 (Pipa)	1	310	Plataforma	1	200
Caminhão RK 22 t	1	290	Microonibus	1	155
Caminhão betoneira	1	260	Pick up	2	115
Carregadeira 5 t	1	250	Pick up	2	128
Caminhão plataforma	3	200	Fandrill	6	97
Caminhão poliguindaste	1	180	Caminhão apoio	1	90
Motoniveladora	1	180			
Caminhão de lubrificação	1	180			
Caminhão de explosivos	1	180			
Scaler	1	160			
Microonibus	1	155			
Carregadeira (Jato)	1	150			
Jumbo	2	130			
Pick up	11	115			
Pick up	4	128			
Manipulador telescópico	1	100			
Fandrill	6	97			
Caminhão apoio	2	90			
Veículo utilitário	1	80			
Robô	1	75			
Trator carregamento	1	75			
Trator bombeamento	1	75			

As Tabela 5.2 e 5.3 apresentam a vazão requerida pela mina Ipueira, durante o horário de trabalho, normal e de ponta respectivamente. Os valores das colunas correspondentes aos rendimentos de cada equipamento dizem respeito ao tempo efetivo de operação em subsolo de acordo com os tempos obtidos pelas cronometragens realizadas ao longo do levantamento.

Tabela 5.2 - Vazão requerida em função dos equipamentos e colaboradores (Horário normal).

Equipamentos	Quant.	$q_w$ ou $q_p$ (m <sup>3</sup> /min)	Potência do motor (CV)	Rendimento (%)	Vazão req. (m <sup>3</sup> /s)
Caminhão 8x4 37t	6	3,5	425	65	96,69
Carregadeira Volvo 10t	1	3,5	325	55	10,43
LHD 14t	3	3,5	335	58	34,00
Caminhão 6x4 (Pipa)	1	3,5	310	45	8,14
Caminhão RK 22t	1	3,5	290	45	7,61
Caminhão betoneira	1	3,5	260	50	7,58
Carregadeira 5t	1	3,5	250	45	6,56
Caminhão plataforma	3	3,5	200	40	14,00
Caminhão poliguindaste	1	3,5	180	30	3,15
Motoniveladora	1	3,5	180	25	2,63
Caminhão de lubrificação	1	3,5	180	30	3,15
Caminhão de explosivos	1	3,5	180	30	3,15
Scaler	1	3,5	160	22	2,05
Microônibus	1	3,5	155	45	4,07
Carregadeira (Jateamento)	1	3,5	150	50	4,38
Jumbo	2	3,5	130	24	3,64
Robô	1	3,5	75	22	0,96
Fandril	6	3,5	97	25	8,49
Trator carregamento	1	3,5	75	50	2,19
Trator bombeamento	1	3,5	75	50	2,19
Manipulador telescópico	1	3,5	100	35	2,04
Veículo utilitário	1	3,5	80	40	1,87
Pick Up	11	3,5	115	50	36,90
Pick Up	4	3,5	128	50	14,93
Caminhão apoio	2	3,5	90	50	5,25
Colaboradores	150	2,0	-	-	5,00
<b>Total</b>			4545		291,05

**Tabela 5.3 - Vazão requerida em função dos equipamentos e colaboradores (Horário de ponta).**

<b>Equipamentos</b>	<b>Quant.</b>	<b><math>q_w</math> ou <math>q_p</math> (m<sup>3</sup>/min)</b>	<b>Potência do motor (CV)</b>	<b>Rendimento (%)</b>	<b>Vazão req. (m<sup>3</sup>/s)</b>
Caminhão 8x4 37t	6	3,5	425	65	96,69
Carregadeira Volvo 10t	1	3,5	325	55	10,43
LHD 14t	3	3,5	335	58	34,00
Caminhão plataforma	1	3,5	200	52	6,07
Microônibus	1	3,5	155	45	4,07
Pick Up	2	3,5	115	50	6,71
Pick Up	2	3,5	128	50	7,47
Caminhão apoio	1	3,5	90	50	2,63
Fandrill	6	3,5	97	25	8,49
Colaboradores	60	2,0	-	-	2,00
<b>Total</b>			<b>1870</b>		<b>178,56</b>

### 5.2.2 Determinação em função da tonelage mensal desmontada

Para a produção média de 93.600 toneladas desmontadas de material (minério + estéril), à época do levantamento (2014), pode-se calcular, portanto, a seguinte vazão necessária em função da tonelage mensal desmontada:

$$Q_T = 180 \times 93.600 = 16.848 \text{ m}^3/\text{min}$$

ou

$$Q_T = 280,8 \text{ m}^3/\text{s}$$

### 5.2.3 Vazão requerida adotada

Como se pode observar, o valor encontrado para a vazão requerida, em função da produção de material desmontado, é inferior ao valor encontrado, em função da potência dos equipamentos a diesel em operação e número de colaboradores, em horário normal. Naturalmente que se fôssemos efetuar, em horário de ponta, o cálculo da vazão requerida, em função da produção de material desmontado (o que consideraria apenas a produção

proporcional a este horário), chegaríamos a um valor bem inferior àquele encontrado, para o mesmo horário, em função dos equipamentos e colaboradores.

O valor encontrado da vazão requerida, em função do consumo de explosivo (inferior a 1 m<sup>3</sup>/s), calculado pela equipe técnica da FERBASA na mesma época, é insignificante em relação aos outros valores de vazão encontrados, não sendo dessa forma considerado. Esse resultado era esperado tendo em vista que, no método de lavra adotado, a relação entre a quantidade de explosivo utilizado e o volume de material desmontado é sempre muito pequena.

Em conformidade com o item 22.24.8 da Norma Regulamentadora, que estabelece que seja adotado para a vazão requerida, o maior valor calculado, o corpo técnico da FERBASA vem adotando como parâmetro de fornecimento de ar fresco para as minas Ipueira os valores calculados em função da potência dos equipamentos e número de colaboradores.

Por outro lado, para assegurar o fornecimento de ar mínimo necessário para a mina, medições devem ser efetuadas, periodicamente, com o objetivo de assegurar que os valores calculados de vazão requerida sejam, na prática, satisfeitos. A Tabela 5.4 compara os valores calculados das vazões totais requeridas, no horário normal e de ponta, e as vazões, efetivamente fornecidas, obtidas por medições efetuadas em pontos específicos, chamados de estações de ventilação.

**Tabela 5.4 - Vazão requerida x Vazão medida na mina (Fonte: FERBASA, 2014).**

<b>Horário</b>	<b>Vazão requerida (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Vazão medida (m<sup>3</sup>/s)</b>
NORMAL	291,05	292,13
DE PONTA	178,56	182,51

### **5.3 Automação do nível 440 de Ipueira IV por meio de sensores**

Com a finalidade de implantar a automação dos ventiladores secundários em função das concentrações de monóxido de carbono na atmosfera subterrânea, foi realizado teste piloto no nível 440 do painel de Ipueira IV. A criação do ambiente propício para esse teste

contou com a instalação de 4 sensores nas paredes do ponto de apoio (PA) do nível em questão, além de um painel de automação (CLP) para receber as informações dos sensores e enviá-las para o inversor de frequência existente no painel do ventilador. Outro passo importante do teste foi estabelecer a parametrização dos dados na central de comando da automação do ventilador. Para tal foi necessário conhecer a rotação mínima do ventilador, necessária para o suprimento ideal de ar nas frentes, que no caso do nível 440 foi de 800 rpm. Esta rotação mínima poderá ser mantida para concentrações de monóxido de carbono de até 10 ppm. Para o valor máximo de concentração de monóxido de carbono, que de acordo com a norma regulamentadora é de 39 ppm, a rotação do ventilador deverá ser máxima, que no caso do ventilador do Nível 440 é de 1780 rpm. Para concentrações de CO a partir de 10 ppm, as rotações do ventilador serão obtidas por interpolação de acordo com os parâmetros da automação estabelecidos. A Figura 5.1 mostra os painéis de automação (à esquerda) e do ventilador (à direita). A Figura 5.2 mostra um desenho esquemático do procedimento da automação por sensores do nível 440 – Ipueira IV.



**Figura 5.1 - Painéis de automação e do ventilador do nível 440 de Ipueira IV.**

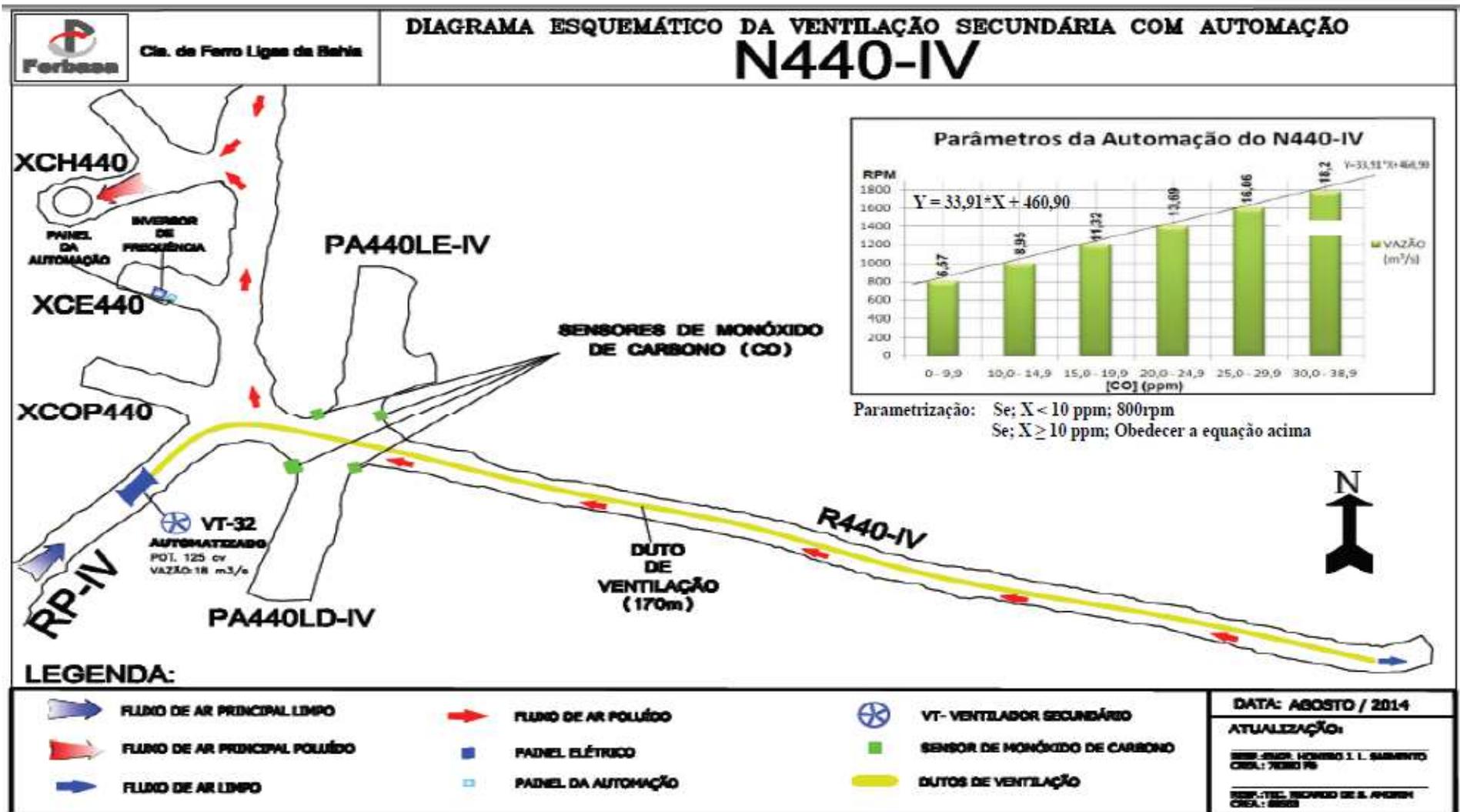


Figura 5.2 - Esquema da automação, por sensores de CO, do nível 440 – Ipuera IV.

#### 5.4 Custo do sistema de ventilação da mina Ipueira

Aplicando-se a metodologia indicada para a determinação do custo do fluxo de ar, fornecido pelo sistema de ventilação da mina Ipueira, chega-se aos resultados mostrados na Tabela 5. 5, que também mostra os dados necessários para a composição desse custo.

**Tabela 5. 5 - Custo específico do ar fornecido pela ventilação secundária (Fonte: FERBASA 2014).**

Painel	VT's	Consumo horário (kW.h)	Vazão		Custo horário (0,18/ kW.h)	Custo de 10000 m <sup>3</sup> (R\$)
			m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /h		
IP. II	VT-34	102	24,85	89460	18,36	2,05
IP. III	VT-59	58	13,07	47052	10,44	1,54
	VT-53	20,8	12,08	43488	3,74	
	VT-66	53,2	16,33	58788	9,58	
IP. IV	VT-29	37,3	13,49	48564	6,71	2,03
	VT-32	90	14,62	52632	16,20	
	VT-38	108	16,9	60840	19,44	
IP. VA	VT-57	43,9	9,1	32760	7,90	2,41
	VT-65	43	13,17	47412	7,74	
	VT-54	96,4	16,99	61164	17,35	
IP. VB	VT-58	51	11,15	40140	9,18	2,23
	VT-45	30,5	12,54	45144	5,49	
	VT-17	43	8,28	29808	7,74	
	VT-60	80,5	18,32	65952	14,49	
IP. VIA	VT-52	74	26,86	96696	13,32	1,77
	VT-40	73,9	21,31	76716	13,30	
<b>Total</b>			249,06	896616	180,98	2,01

O levantamento da ventilação secundária permitiu também a elaboração do gráfico mostrado na Figura 5.3, que corresponde ao consumo de energia de cada ventilador secundário nos horários normal e de ponta, durante o mês de agosto/2014.

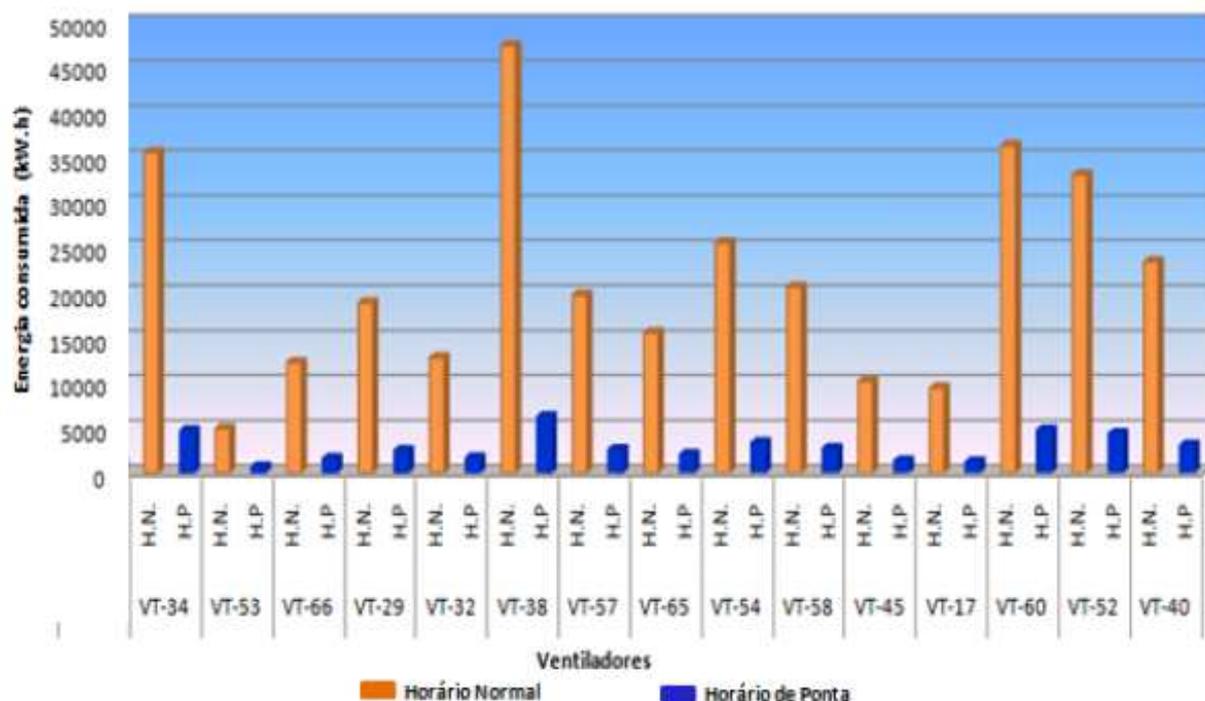


Figura 5.3 - Distribuição da energia consumida nos horários normal e de ponta.

Com base nas tarifas pagas pela FERBASA (R\$ 0,18/kW.h e R\$ 0,29/kW.h nos horários normal e de ponta, respectivamente), também pode se determinar o custo mensal (em reais) do consumo de energia elétrica do sistema de ventilação.

Nesse período da análise (agosto/2014), se chegou à conclusão que a ventilação secundária (com custo mensal na faixa de R\$ 70.000,00), apresentou um consumo maior que o correspondente à ventilação principal. A relação da energia consumida com o sistema de ventilação corresponde ao gráfico mostrado na Figura 5.4.



Figura 5.4 - Consumo atual dos sistemas de ventilação (Fonte: FERBASA, 2014).

Análises de dados anteriores de consumo de energia podem mostrar que esta relação apresentava uma situação inversa antes de investimentos realizados pela Empresa para implantação da automação e monitoramento dos ventiladores principais. Assim, uma busca constante pela automação da ventilação secundária, certamente acarretará uma nova inversão na relação de custos entre ventilação principal e secundária, provocada por uma redução no consumo de energia desta última.

### 5.5 Análise da ventilação principal (simulações)

A análise realizada, por meio de simulações efetuadas no Ventsim, da retirada dos ventiladores principais da chaminé do painel de Ipueira II, motivada pela previsão do encerramento das atividades naquele painel, teve a finalidade de estudar o comportamento das vazões e consumo de energia dos outros ventiladores principais nas duas situações. Os resultados obtidos nas simulações estão mostrados na Figura 5.5.

Pelos valores do consumo mensal de energia elétrica, mostrados na Figura 5.5, pode-se observar uma economia mensal de R\$ 7.845,05 no mês. Esta economia pode ser atribuída à influência que a retirada dos ventiladores principais de Ipueira II exerceu no consumo dos demais ventiladores do complexo mineiro. Esta influência, apesar de poder ser considerada pequena no consumo individual de cada ventilador, torna-se significativa quando considerada no conjunto total dos ventiladores.

Simulando a retirada do Ventilador Principal de Ipueira II					
Com o Ventilador de Ipueira II Ligado			Com o Ventilador de Ipueira II Desligado		
Ipueira II	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	34,9	—	—	—
VT-50 e VT-51	Potencia (kW)	26	—	—	—
Ipueira III	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	118,6	Ipueira III	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	120,3
VT-36 e VT-37	Potencia (kW)	119,9	VT-36 e VT-37	Potencia (kW)	117,4
Ipueira VA	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	42,8	Ipueira VA	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	44,5
VT-63 e VT-64	Potencia (kW)	15,1	VT-63 e VT-64	Potencia (kW)	13,7
Ipueira VB	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	68,8	Ipueira VB	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	69,6
VT-61 e VT-62	Potencia (kW)	41,3	VT-61 e VT-62	Potencia (kW)	39,9
Ipueira VI-A	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	53,6	Ipueira VI-A	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	54,6
VT-41 e VT-42	Potencia (kW)	21,3	VT-41 e VT-42	Potencia (kW)	20,2
Custo mensal Total		R\$ 68.743,66	Custo mensal Total		R\$ 60.898,61

Figura 5.5 - Análise da retirada dos ventiladores principais de Ipueira II (Fonte: FERBASA, 2014).

A Tabela 5.6 contém os locais de medição e os valores de vazão, medidos em campo e fornecidos pelo Ventsim, com e sem os ventiladores de Ipueira II. A comparação dos resultados, simulados e medidos em campo, apresentaram uma diferença de aproximadamente 3,3%.

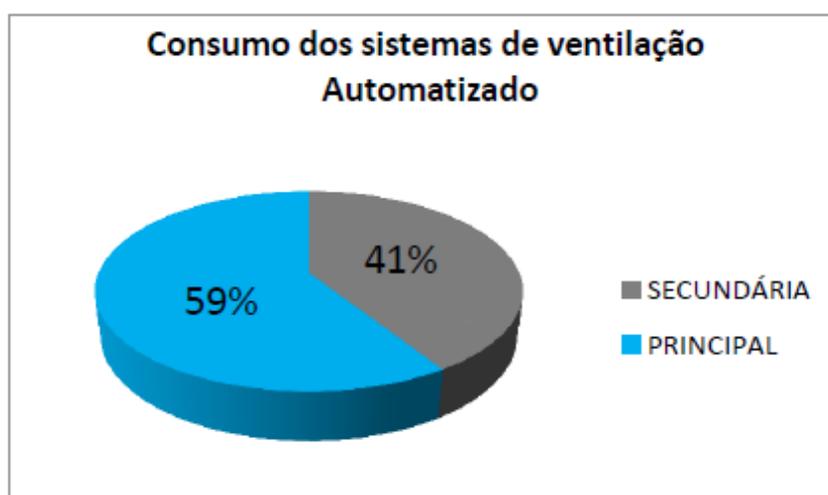
**Tabela 5.6 - Comparação entre as vazões obtidas pelo Ventsim e as medidas em campo**  
(Fonte: FERBASA, 2014)

Local	Dados obtidos	Simulação	
		Vazão (m <sup>3</sup> /s)	
		Com ventiladores	Sem ventiladores
Entrada de Ipueira II	Vazão pelo Ventsim	146,7	103,8
	Vazão medida	151,66	109,20
RP-3 (Ponto 1)	Vazão pelo Ventsim	72,7	56,1
	Vazão medida	69,00	57,8
RC – 2/3	Vazão pelo Ventsim	41,7	81,2
	Vazão medida	40,10	83,28
RP-3 (Ponto 2)	Vazão pelo Ventsim	34	35,7
	Vazão medida	33,44	36,8
RC –3/4 (Oficina)	Vazão pelo Ventsim	56,5	76,9
	Vazão medida	54,00	74,00

Observando os dados da Tabela 5.6, algumas conclusões importantes podem ser tiradas. Primeiramente chama-se a atenção para o fato de que as diferenças entre os valores fornecidos pelo programa de computador e os medidos em campo são muito pequenas. Esta comparação serve como comprovação da confiabilidade do software utilizado. Em segundo lugar, podem ser observadas alterações das vazões na maioria dos locais de medição (o Ponto 2 da RP-3 apresentou variação insignificante). Porém, se temos locais com valores menores de vazão com os ventiladores de Ipueira II desligados (Entrada de Ipueira II e Ponto 1 da RP-3), por outro lado, com a mesma condição, outros locais tiveram suas vazões aumentadas (RC-2/3 e RC-3/4). Assim, neste caso, considerando as vazões medidas em campo ou fornecidas pela simulação, nos locais pesquisados, a vazão total sofreu um acréscimo, apesar do desligamento dos ventiladores de Ipueira II.

## 5.6 Automação da ventilação secundária

Sabe-se que a energia consumida pelo sistema de ventilação das minas Ipueira representa algo próximo de 45% de toda a energia consumida em subsolo. Deste percentual, conforme visto na análise de custos do sistema de ventilação, a ventilação secundária contribui com 56% contra os 44% consumidos pela ventilação principal. Com a implantação do sistema de automação pode-se verificar, utilizando, nas simulações, dados do período entre 01/07 e 01/08/2014, que a relação de consumo entre os sistemas principal e secundário mudaria significativamente conforme pode ser visto no gráfico da Figura 5.6.



**Figura 5.6 - Estimativa da relação do consumo de energia com a automação do sistema de ventilação (Fonte: FERBASA, 2014).**

A Tabela 5.7 exhibe, além de outros dados, o consumo de energia por ventilador secundário e o custo associado a este consumo, considerando o sistema com as características atuais, ou seja, sem automação. A Tabela 5.8, semelhante à anterior, mostra os dados dos mesmos parâmetros, considerando, todavia, a hipótese do sistema se encontrar automatizado. A Tabela 5.9 compara os dados de consumo do sistema secundário nas duas condições.

Nas Figura 5.7, 5.8 e 5.9 são mostrados gráficos demonstrativos do consumo energético dos ventiladores secundários, nos meses de agosto a outubro/2014, considerando a situação do sistema se encontrar ou não automatizado.

**Tabela 5.7 - Parâmetros do sistema atual da ventilação secundária (Fonte: FERBASA, 2014).**

<b>Parâmetro/Mina</b>	<b>Ip. II</b>	<b>Ipueira III</b>			<b>Ipueira IV</b>			<b>Ipueira V.A</b>			<b>Ipueira V.B</b>			<b>Ipueira VI.A</b>			
<b>Ventiladores</b>	<b>VT-34</b>	<b>VT-59</b>	<b>VT-53</b>	<b>VT-66</b>	<b>VT-29</b>	<b>VT-32</b>	<b>VT-38</b>	<b>VT-57</b>	<b>VT-65</b>	<b>VT-54</b>	<b>VT-58</b>	<b>VT-45</b>	<b>VT-17</b>	<b>VT-60</b>	<b>VT-52</b>	<b>VT-40</b>	
<b>Potência do motor (CV)</b>	125	100	125	75	125	125	125	75	75	125	125	125	75	100	125	125	
<b>Velocidade angular (rpm)</b>	1780	1780	1200	1775	1750	1780	1780	1775	1775	1780	1780	1200	1775	1780	1780	1780	
<b>Potência de trabalho (kW.h)</b>	102	58	20,8	53,2	37,3	90	108	43,9	43	96,4	51	30,5	43	80,5	74	73,9	
<b>Horímetro mensal</b>	395	0	268	261	573	161	497	510	409	300	458	377	248	511	506	359	<b>Total</b>
<b>Energia consumida (kW.h)</b>	40.290	0	5.574	13.885	21.372	14.490	53.676	22.389	17.587	28.920	23.358	11.498	10.664	41.135	37.444	26.530	368.812
<b>Custo mensal (R\$)</b>																	
<b>Horário Normal (0,18 R\$/kW.h)</b>	6.410	-	887	2.209	3.400	2.305	8.540	3.562	2.798	4.601	3.716	1.829	1.696	6.545	5.958	4.221	58.677
<b>Custo mensal (R\$)</b>																	
<b>Horário de Pico (0,29 R\$/kW.h)</b>	1.355	-	187	467	718	487	1.805	753	591	972	785	386	358	1.383	1.259	892	12.398
<b>Custo mensal total por VT</b>	7.765	0	1.074	2.676	4.118	2.792	10.345	4.315	3.389	5.573	4.501	2.215	2.054	7.928	7.217	5.113	71.075

**Tabela 5.8 - Parâmetros do sistema automatizado da ventilação secundária (Fonte: FERBASA, 2014).**

<b>Parâmetro/Mina</b>	<b>Ip. II</b>	<b>Ipueira III</b>			<b>Ipueira IV</b>			<b>Ipueira V.A</b>			<b>Ipueira V.B</b>			<b>Ipueira VI.A</b>			
<b>Ventiladores</b>	<b>VT-34</b>	<b>VT-59</b>	<b>VT-53</b>	<b>VT-66</b>	<b>VT-29</b>	<b>VT-32</b>	<b>VT-38</b>	<b>VT-57</b>	<b>VT-65</b>	<b>VT-54</b>	<b>VT-58</b>	<b>VT-45</b>	<b>VT-17</b>	<b>VT-60</b>	<b>VT-52</b>	<b>VT-40</b>	
<b>Velocidade angular (rpm)</b>	1200	1300	1000	1300	1200	800	1780	1775	1775	1200	1100	1200	1775	1780	1780	1780	
<b>Potência de trabalho (kW.h)</b>	27,1	24	12	16,1	23,6	8,7	108	43,9	43	30,9	21,4	30,5	43	80,5	74	73,9	
<b>Horas mensais</b>	395	0	268	261	573	161	497	510	409	300	458	377	248	511	506	359	<b>Total</b>
<b>Energia consumida (kW.h)</b>	10.704	0	3.216	4.202	13.522	1.400	53.676	22.389	17.587	9.270	9.801	11.498	10.664	41.135	37.444	26.530	273.038
<b>Custo mensal (R\$)</b>																	
<b>Horário Normal (0,18 R\$/kW.h)</b>	1.703	-	511	668	2.151	222	8.540	3.562	2.798	1.475	1.559	1.829	1.696	6.545	5.958	4.221	43.438
<b>Custo mensal (R\$)</b>																	
<b>Horário de Pico (0,29 R\$/kW.h)</b>	360	-	108	141	454	47	1.805	753	591	311	329	386	358	1.383	1.259	892	9.177
<b>Custo mensal total por VT</b>	2.063	0	619	809	2.605	269	10.345	4.315	3.389	1.786	1.888	2.215	2.054	7.928	7.217	5.113	52.615

**Tabela 5.9 - Comparativo entre os sistemas de ventilação secundária (Fonte: FERBASA, 2014).**

Parâmetro/Mina		Ip. II	Ipueira III			Ipueira IV			Ipueira V.A			Ipueira V.B			Ipueira VI.A			
Ventiladores		VT-34	VT-59	VT-53	VT-66	VT-29	VT-32	VT-38	VT-57	VT-65	VT-54	VT-58	VT-45	VT-17	VT-60	VT-52	VT-40	
<b>Sistema atual</b>	<b>Energia consumida (kW.h)</b>	40290	0	5574	13885	21372	14490	53676	22389	17587	28920	23358	11498	10664	41135	37444	26530	368.812
<b>Sistema automatizado</b>	<b>Energia consumida (kW.h)</b>	10704	0	3216	4202	13522	1400	53676	22389	17587	9270	9801	11498	10664	41135	37444	26530	273.038
<b>-</b>	<b>Economia (kW.h)</b>	29586	0	2358	9683	7850	13090	0	0	0	19650	13557	0	0	0	0	0	95.774
<b>Sistema atual</b>	<b>Custo mensal (R\$)</b>	7765	0	1074	2676	4118	2792	10345	4315	3389	5573	4501	2215	254	7928	7217	5113	71.075
<b>Sistema automatizado</b>	<b>Custo mensal (R\$)</b>	2063	0	619	809	2605	269	10345	4315	3389	1786	1888	2215	2054	7928	7217	5113	52615
<b>Economia</b>	<b>R\$</b>	5702	0	454	1867	1513	2523	0	0	0	3787	2613	0	0	0	0	0	18.460
	<b>KW.h</b>	73%	0%	42%	70%	37%	90%	0%	0%	0%	68%	58%	0%	0%	0%	0%	0%	26%

Consumo em kw.h x mês de Agosto



Figura 5.7 - Consumo dos ventiladores secundários em relação à condição do sistema - Mês de Agosto/2014 (Fonte: FERBASA, 2014).

### Consumo em kw.h x mês de Setembro

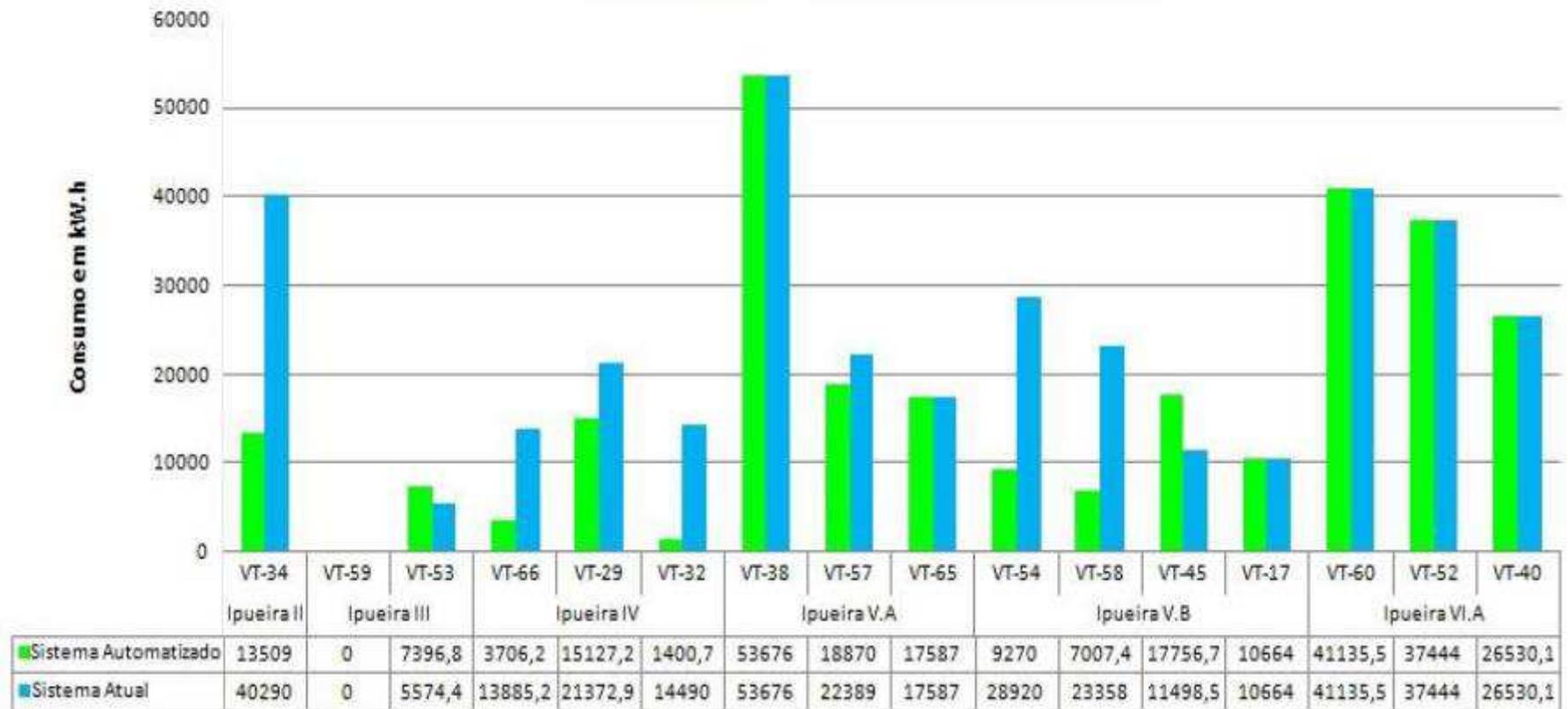


Figura 5.8 - Consumo dos ventiladores secundários em relação à condição do sistema - Mês de Setembro/2014 (Fonte: FERBASA, 2014).

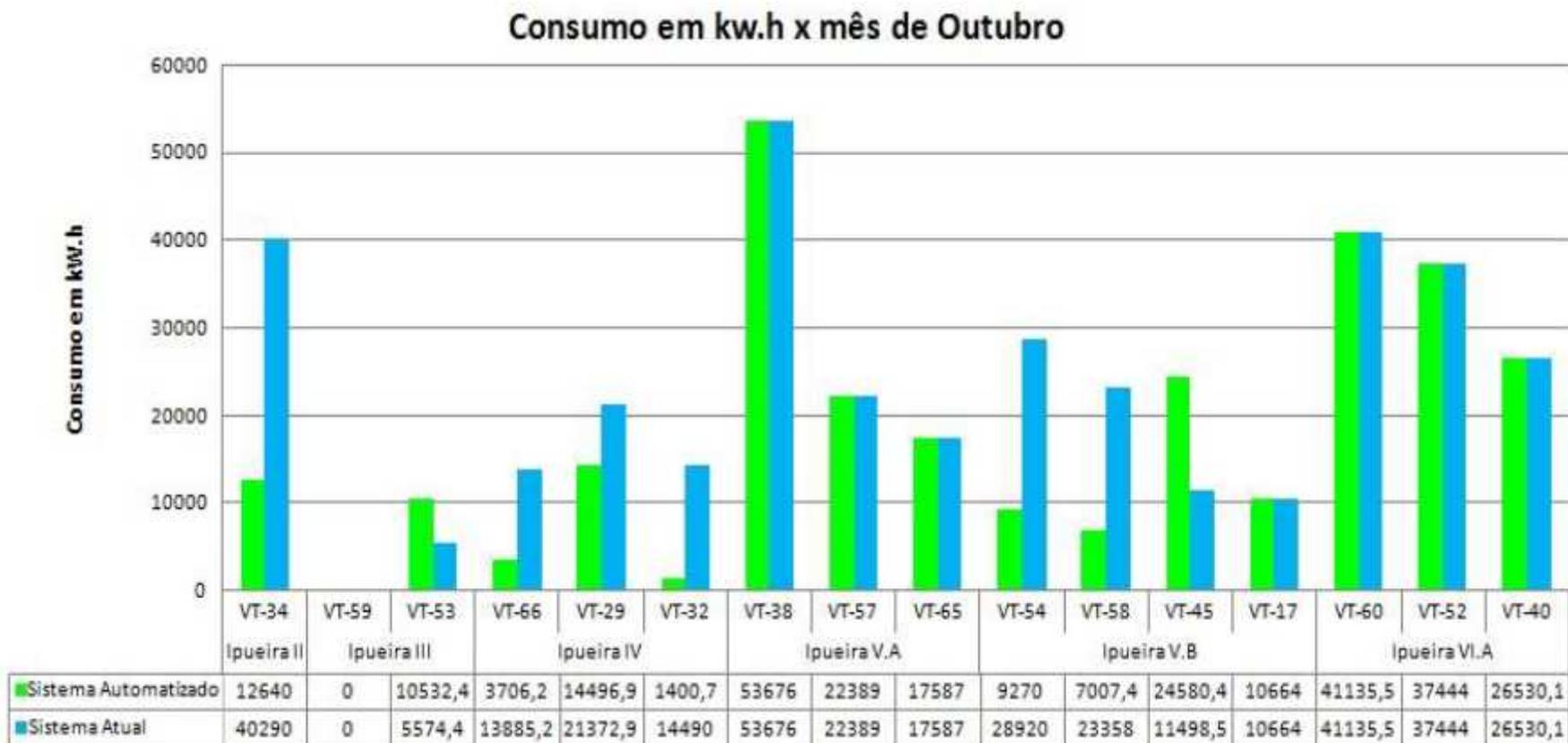


Figura 5.9 - Consumo dos ventiladores secundários em relação à condição do sistema - Mês de Outubro/2014 (Fonte: FERBASA, 2014).

A análise das tabelas e gráficos anteriores permite observar que alguns ventiladores mantêm os seus consumos nas duas condições simuladas. Isto se deve ao fato de que esses ventiladores operam sobrecarregados nas duas condições, permanecendo com as rotações máximas nas duas situações, devido ao nível de intensidade das atividades nestes pontos. Este seria o caso de se estudar a possibilidade da colocação de novos ventiladores nesses locais, para tornar o sistema mais eficiente, possibilitando o ajustamento dos mesmos para rotações menores. Esta ação poderia resultar em diminuição do consumo de energia mesmo considerando a utilização de novos ventiladores.

Os resultados do estudo comparativo demonstram claramente uma economia de consumo de energia e conseqüentemente financeira que poderia advir da implantação do sistema de automação e monitoramento do circuito de ventilação secundária da mina Ipueira. Conforme se pode observar dos resultados numéricos da análise, o consumo mensal de 368.812 kW.h, sem a automação do sistema, que representa um custo de R\$ 71.075,00, cairia, com a automação do sistema, para 273.038 kW.h, ao custo de R\$ 52.615,00. Esta economia mensal de R\$18.460,00 representa uma redução de consumo muito próxima de 26%.

Deve ser ressaltado o caráter dos valores obtidos nesta análise. Estes valores resultaram de simulações no Ventsim, além de medições em campo, tendo como base, o cronograma de desenvolvimento e produção das minas de Ipueira no quadriênio 2014-2017.

## **CAPÍTULO 6**

### **CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

## CAPÍTULO 6

### 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões sobre o alcance da pesquisa e algumas sugestões para trabalhos futuros.

#### 6.1 Conclusões

Como um dos primeiros passos previstos na metodologia adotada, foram determinadas as vazões requeridas pela mina em função dos diversos fatores que exercem influência na sua determinação. Para tal, foram seguidas as recomendações da Norma Regulamentadora nº 22 do MTE, que trata da segurança do trabalho nas atividades de mineração. Para a realização dessa ação tornou-se necessário o conhecimento de diversos dados, entre os quais, os relativos à frota de transportes e equipamentos com motores a óleo diesel, operando em subsolo, e os dados de produção de material desmontado (minério + estéril).

A comparação entre os valores calculados de vazões requeridas e os das vazões medidas em campo indicaram uma variação muito pequena. Essa pequena variação, resultante de fatores que influenciam nas medições em campo, como a calibração dos instrumentos de medição e o fator de fricção ( $K$ ) adotado, comprova que o suprimento de ar fornecido pelo sistema de ventilação tem atendido às exigências estabelecidas na norma regulamentadora.

A automação do sistema de ventilação da mina Ipueira por meio de sensores, para o controle da vazão nas frentes de serviço, ainda encontra-se em fase de teste. Foram realizados alguns experimentos em galerias de desenvolvimento, em diversos níveis da mina, como foi o caso do nível 440 do painel de Ipueira IV. Nesse tipo de monitoramento as rotações dos rotores dos ventiladores variam de acordo com as concentrações medidas pelos sensores. Nos testes realizados nesta pesquisa, apenas o monóxido de carbono (CO) foi contemplado.

Como uma das fases mais importantes da pesquisa, foi realizado o mapeamento de todo o sistema de ventilação secundária. Esse mapeamento incluiu um levantamento, galeria por galeria, de todos os elementos importantes para o sistema secundário, tais como: quantidade, situação e estado de conservação dos dutos de ventilação; características dos ventiladores;

tipos de chave de partida; galerias de abrangência de cada ventilador, entre outros. Todas as fases posteriores da pesquisa dependiam dos dados obtidos nesse mapeamento.

Foi elaborado um diagnóstico do consumo de energia do sistema de ventilação existente, tomando por base os dados de operação do mês de julho/2014. A partir do conhecimento das potências e tempo de operação de todos os ventiladores principais e secundários foi possível se chegar a esse diagnóstico. Conhecendo-se as tarifas de energia, pagas pela FERBASA, calculou-se o custo mensal do sistema. Desse diagnóstico, chegou-se à conclusão que o custo mensal da ventilação secundária (na faixa de R\$ 70.000,00), representava 56% do custo total do sistema contra 44% da ventilação principal. Essa constatação tornou-se mais uma motivação para a empresa passar a investir na modernização da ventilação secundária.

Foram feitas simulações, com a adoção de medidas de automação, com relação a ajustes de velocidades de rotação dos ventiladores, provocadas por variações nos parâmetros determinantes de resistência e vazão requerida. Como exemplo de variação desses parâmetros, tem-se o avanço e/ou recuo de dutos de ventilação. Como se sabe, o avanço ou recuo dos dutos, resultantes da programação do planejamento, provocam alterações na resistência do setor que reflete diretamente na potência requerida para o suprimento da vazão necessária. Esses dados alimentam o Ventsim na execução das simulações. As simulações foram realizadas com os dados do período entre 01/07 e 01/08/2014 e mostraram uma significativa mudança na relação de consumo entre os sistemas principal e secundário, onde a ventilação secundária contribuiu com 41% do consumo total do sistema contra 59% da ventilação principal.

Foram realizados estudos comparativos sobre o comportamento do sistema de ventilação operando de forma convencional e a automatizada. Seus resultados demonstram claramente uma economia no consumo de energia e consequentemente financeira que poderia advir da implantação do sistema de automação e monitoramento do circuito de ventilação secundária da mina Ipueira. Conforme se pode observar dos resultados numéricos da análise, o consumo mensal de 368.812 kW.h, sem a automação do sistema, que representa um custo de R\$ 71.075,00, cairia, com a automação do sistema, para 273.038 kW.h, ao custo de R\$ 52.615,00. Esta economia mensal de R\$18.460,00 representa uma redução de consumo muito próxima de 26%.

## **6.2 Sugestões para trabalhos futuros**

A economia de consumo energético, obtida com a implantação de automação e monitoramento do sistema de ventilação secundária, verificada pelas simulações, pode alcançar contornos ainda mais significativos com a adoção de outras medidas relativas a novas práticas, atualmente estudadas, de aperfeiçoamento do sistema de ventilação.

A automação do sistema de ventilação por meio de sensores, para o controle da vazão nas frentes de serviço, deve ser encarada como uma prioridade para garantir suprimento de ar na quantidade e qualidade desejáveis. A empresa deve ter como meta a expansão da rede de sensores, tanto do ponto de vista do alcance do maior número possível de frentes de serviço, como com relação à diversificação dos agentes químicos e físicos a serem monitorados (gases tóxicos e inflamáveis, poeiras, temperatura, umidade do ar, etc.).

Não se deve menosprezar a adoção de práticas tradicionais como é o caso de uma busca constante da minimização da resistência do circuito. Diversas medidas de baixo custo, como é o caso da substituição de dutos de menores por outros de maiores diâmetros, podem ser tomadas. O alargamento de chaminés e outras aberturas, ou a comunicação entre níveis, ou entre galerias do mesmo nível, são medidas que devem ser analisadas.

Sugere-se ainda uma permanente e contínua prática de simulações, com o máximo de alternativas, no tocante à variações dos parâmetros de ventilação, que através de análise de sensibilidade, busquem o aperfeiçoamento do sistema de ventilação atual da Mina Ipueira, objetivando caracterizá-lo como uma referência para as minas subterrâneas no Brasil.

## REFERÊNCIAS

ALVES, C. S. **Caracterização do maciço rochoso com o uso de testemunhos de sondagem na mina Ipueira 3, Andorinha – Bahia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas). Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2005.

BAASE R. A.; DIMENT, W. D.; PETRINA A. J. **Underground mining methods handbook**, Ed. Hustrulid, W.A. Society of Mining Engineers of The American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc., New York, New York, 1982.

BAIDEN, G.R. Telemining™. **Systems applied to hard rock metal mining at Inco Ltd.**, *Proceedings*, Mine Operators Conference, Sudbury. Ontario, 2001.

BRUNA, B. P. D; CONTESSI, G.; ROSSETI, M.; ROSSO, P. H. F.; TASSI, R. **Estudo de acionamentos das chaves de partidas elétricas e eletrônicas para motores elétricos**. Revista Técnico Científica, v. 31, n. 1. Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense, Curitiba, 9 p., 2012.

CHASTEAU, V. A. L. **Fundamentals of airflow**. Ch. 11. *In: The Ventilation of South Africa Gold Mines*. The Mine Society of South Africa, 1974.

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

DE LA HARPE, J. H. **Basic fan engineering**, Ch. 17. *In: The Ventilation of South Africa Gold Mines*. The Mine Society of South Africa, 1974.

DEUS, P. B.; VIANA, J. S. **Distrito Cromitífero do Vale do Jacuricé**. In: XXXII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA. Salvador: SBG, Núcleo Bahia, 1982.

FERBASA - **Cia. de Ferro Ligas da Bahia/ Mineração vale do Jacurici**. Departamento de planejamento e departamento de geologia / Trabalhos, arquivos e relatórios internos não publicados. Bahia, 2003

GARI, L. I.; KOCSIS, C.; HARDCASTLE, S. Sensitivity analysis on parameter changes in underground mine ventilation Systems. **Journal of Coal Science & Engineering**, v. 17, n. 3, p. 251, 2011.

GRAU, III, R. H.; KROG, R. Using mine planning and other techniques to improve ventilation in large-opening mines. **Mining Engineering**, p. 46, 2009.

HARDCASTLE, S. G.; KOCSIS, C.; BRISSIRI, Y.; BAIDEN, G. **Optimizing mine ventilation through the use of life-cycle production models**. In: Proc. 8th International Mine Ventilation Congress. Brisbane, Australia, 2005.

HARDCASTLE, S. G.; KOCSIS, C.; O'CONNOR, D. **Justifying ventilation-on demand in a Canadian mine and the need for process based simulations**. In: Proc. 11th U.S./North American Mine Ventilation Symposium 2006. Taylor and Francis Group Plc., 2006.

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

HENNING, J. G.; MITRI, H. S. Assessment and control of dilution, in long hole Mining: case studies, **Geotech. Geol. Eng.**, DOI 10.1007/s10706-008-9172-9, 2008.

KAIYAN, C.; JUNHONG, S.; FUBAO, Z.; RENWEI, Z.; He, S.; Hongmei, Z. Optimization of air quantity regulation in mine ventilation networks using the improved differential evolution algorithm and critical path method. **International Journal of Mining Science and Technology**, v. 25, p. 79, 2015.

KEITH, W.; BRIAN, P. STINETTE, J. D. The practice of mine ventilation engineering. **International Journal of Mining Science and Technology**, v. 25, p. 165, 2015.

KOCSIS, C. K.; HARDCASTLE, S. Ventilation system operating cost comparison between a conventional and an automated underground metal mine. **Mine Engineering**, p. 57, 2004.

LI, G.; KOCSIS, C.; HARDCASTLE, S. Sensitivity analysis on parameter changes in underground mine ventilation systems. **Journal of Coal Science & Engineering**, v. 17, n. 3, pp. 251-255, 2011

LIMA, A. A.; OLIVEIRA, W. L.; ALCÂNTARA, W. W. M.; LEITE, E. N.; SARMENTO, H. J. L.; ALVES, C. S.; SILVA, C. A. V.; SANTOS, F. S. **Modificação do Método de Lavra Visando Reduzir a Diluição em Corpos Sub-Horizontais, Mina Ipueira - FERBASA, Andorinha, Bahia.** In: V Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto e V Congresso Brasileiro de Mina Subterrânea, 2008, Belo Horizonte. V Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto e V Congresso Brasileiro de Mina Subterrânea. Belo Horizonte, MG: DEMIN-UFMG / IBRAM, 2008. p. 1-16.

PAREDE, I. M, *et al.* **Automação Industrial (Centro Paula Souza).** Habilitação técnica em eletrotécnica. Vol. 6. Fundação Padre Anchieta, 2011.

PARRA, M. T.; VILAFRUELA, J. M.; CASTRO, F.; MÉNDEZ, C. Numerical and experimental analysis of different ventilation systems in deep mines. **Building and Environment**, v. 41, p. 87, 2006.

PETROV, N. N.; POPOV, N. A. Ways improving economy and reliability of mine ventilation. **Journal of Mining Science**, v. 40, n. 5, p. 531, 2004.

SOUZA, E. Improving the energy efficiency of mine fan assemblages. **Applied Thermal Engineering**, v. 90, p. 1092, 2015.

SUMARIO MINERAL. **A capacidade nominal de produção de concentrado de cromo.** In: DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. 2015, Anais eletrônicos. Brasília: 2015.

TAPP, A.C. Sampling, dilution, and recovery. **Underground mining methods handbook**, Ed. Hustrulid, W.A. Society of Mining Engineers of The American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc., New York, New York, 1982.

VUTUKURI, V. S.; LAMA, R. D. **Environmental engineering in mines**. Cambridge University Press, 1986.

WALA, A. M.; VYTILA, S.; TAYLOR, C. D.; HUANG, G. Mine face ventilation: a comparison of CFD results against benchmark experiments for the CFD code validation. **Mining Engineering**, p. 49, 2007.

YANES, E. **Ventilation des minas**. Departamento de Minas, Universidad de Chile, Santiago, 1977.