



UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE MARABÁ/PA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MINAS E MEIO AMBIENTE

**SIMULAÇÃO DA VENTILAÇÃO EM MINA SUBTERRÂNEA**

HERMESON CARNEIRO RODRIGUES

MARABÁ – PA  
JULHO DE 2014

HERMESON CARNEIRO RODRIGUES

## **SIMULAÇÃO DA VENTILAÇÃO EM MINA SUBTERRÂNEA**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente (FEMMA) da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA), em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Doutorando Evaldiney Ribeiro Monteiro – Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente (FEMMA).

MARABÁ – PA  
JULHO DE 2014

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Biblioteca II da UNIFESSPA. CAMAR, Marabá, PA**

---

Rodrigues, Hermeson Carneiro

Simulação da ventilação em mina subterrânea/ Hermeson Carneiro Rodrigues ; orientador, Evaldiney Ribeiro Monteiro. — 2014.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Campus Universitário de Marabá, Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente, Curso de Engenharia de Minas e Meio Ambiente, Marabá, 2014.

1. Mineração subterrânea. 2. Ventilação - Simulação por computador. 3. Engenharia de minas - Programas de computador. I. Monteiro, Evaldiney Ribeiro, orient. II. Título.

CDD: 22. ed.: 622.23

---

HERMESON CARNEIRO RODRIGUES

## **SIMULAÇÃO DA VENTILAÇÃO EM MINA SUBTERRÂNEA**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente (FEMMA) da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA), em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Doutorando Evaldiney Ribeiro Monteiro – Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente (FEMMA).

Data da Aprovação: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Conceito: \_\_\_\_\_

Banca Examinadora:

---

Prof. Doutorando Evaldiney Ribeiro Monteiro (Orientador)  
(Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente – FEMMA/UNIFESSPA)

---

Prof. Doutorando Dennin Tomás Quispe Arapa (Membro)  
(Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente – FEMMA/UNIFESSPA)

---

Prof. Eng. Manoel Ferreira Nunes (Membro)  
(Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente – FEMMA/UNIFESSPA)

Aos meus pais, Reginaldo e Izanete, meus maiores incentivadores,  
e à minha filha, Heloísa Helena, com amor e dedicação.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade concedida de cursar este curso e pelo dom do conhecimento, o qual me permitiu chegar até aqui.

Aos meus pais, Reginaldo e Izanete, que me deram a educação, incentivo e apoio necessários durante todo esse percurso.

À UFPA, em especial ao Professor Denilson Costa, pela confiança depositada, com a oportunidade de participar do Programa Ciência Sem Fronteiras na Università di Bologna, Itália.

Ao Prof. Doutorando Evaldiney Ribeiro Monteiro, pelos conhecimentos repassados durante a realização desse trabalho.

Aos Professores Dennin Arapa e Manoel Nunes pelo apoio concedido nos meus momentos de dúvida, e por aceitarem participar da minha banca.

Ao Professor Antonio Carlos Vallinoto por todo apoio concedido para que a minha viagem à Itália desse certo.

A mãe Italiana Maura Pazzi, por ter sido uma verdadeira mãe, além de profissional da UNIBO, por ter cuidado de mim enquanto fiquei doente e minha família estava longe.

Ao Professor Stefano Bonduà da Università di Bologna por ter sido além de Professor, um verdadeiro amigo, sempre se mostrando presente, e por ter ajudado na realização da atividade de estágio no exterior.

Aos Professores, Paolo Berry, Alessandra Bonoli, Ezio Mesini, pelos conhecimentos repassados e pela amizade.

Aos amigos Thiago Celso, Lucas Bicelli, Mayara Lisboa e Izabella Vargens pelos momentos de companheirismo, felicidades e tristezas compartilhados, de onde pude tirar muitas lições de vida.

Aos estudantes Jailson Sousa e Thaís Maia pelo apoio na realização do trabalho experimental.

Ao colega de curso Ailton Pantoja pelo desenho da maquete no AutoCad.

Aos meus colegas de turma que participaram da minha vida durante esses cinco anos de graduação.

Aos Professores da Faculdade de Engenharia de Minas e Meio Ambiente pelos ensinamentos repassados.

À todos os profissionais da UNIBO.

A todos os brasileiros que através do seu trabalho contribuíram para minha formação acadêmica.

A todos que me incentivaram e me deram apoio para nunca desistir dos meus objetivos.

**MUITO OBRIGADO!**

## **RESUMO**

As operações realizadas para a escavação de uma mina subterrânea produzem, poeira, material particulado, liberam gases nocivos por conta das detonações, além das partículas geradas pelos meios de transporte, produzidas através da combustão incompleta do diesel. Desta forma em toda mina subterrânea deve haver sistemas de ventilação a fim de fornecer um fluxo de ar limpo no ambiente de trabalho para que a realização deste ocorra com eficiência e segurança desejáveis. Para a otimização e análise destes sistemas, atualmente, utilizam-se técnicas computacionais. Neste contexto, este trabalho apresenta as etapas para o desenvolvimento de um modelo de simulação do sistema de ventilação, no programa Ventsim, de uma maquete de uma mina subterrânea.

**Palavras-Chave:** ventilação, modelo computacional e mini-mina.

## **ABSTRACT**

The operations carried out an excavation of an underground mine producing, dust, particulate matter, release harmful gases because of the detonations, besides the particles generated by transport, produced by incomplete combustion of diesel. Thus, every underground mine ventilation systems should be to provide a flow of clean air in the work environment for that achievement this occurs with efficiently and safely desirable. For the analysis and optimization of these systems currently use computational techniques. In this context, this paper presents the steps for developing a simulation model of the ventilation system in Ventsim program, of a mockup of an underground mine.

**Key words:** ventilation, computational model and mockup of mine.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Curva característica de uma galeria. ....	23
Figura 2. Construção do nível 1 e rampa 1 da maquete. ....	26
Figura 3. Construção do nível 2 da maquete. ....	27
Figura 4. Construção da rampa 2 e nível 3 da maquete. ....	27
Figura 5. Construção do nível 3 e chaminé da maquete. ....	27
Figura 6. Ventiladores da mina. ....	28
Figura 7. Visão geral da mina maquete. ....	28
Figura 8. Barra de tarefas do programa Ventsim. ....	31
Figura 9. Janela de inserção de características do circuito. ....	31
Figura 10. Item database do menu principal do software. ....	32
Figura 11. Janela de edição para os níveis estabelecidos no diagrama de ventilação. ....	32
Figura 12. Janela de edição e inserção de dados sobre os ventiladores. ....	32
Figura 13. Janela de visualização dos trechos estabelecidos com suas características. ....	33
Figura 14. Circuito de ventilação construído no VentSim com uma simulação de fluxo de ar. ....	34
Figura 15. Simulação do circuito de ventilação da mina maquete apresentando a vazão constante. ....	36
Figura 16. Validação entre os valores de velocidade medidos e simulados. ....	36
Figura 17. Erro relativo dos dados medidos e simulados. ....	37

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1. Fatores de perdas de carga recomendados. ....	25
Tabela 2. Comparação dos valores de velocidade medidos e simulados. ....	35

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>15</b>
3.1	CONDICIONANTES DA ENGENHARIA AMBIENTAL SUBTERRÂNEA....	17
3.2	CIRCUITO BÁSICO DE VENTILAÇÃO.....	19
3.2.1	Circuito Principal .....	20
3.2.2	Circuito secundário.....	20
3.3	FERRAMENTAS PARA MODELAGEM COMPUTACIONAL .....	21
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>26</b>
4.1	CONSTRUÇÃO DA MAQUETE .....	26
4.2	EXECUÇÃO DAS MEDIDAS .....	30
4.3	CONSTRUÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL .....	30
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>35</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>39</b>
<b>7</b>	<b>RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>40</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>41</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A ventilação é por vezes descrita como o “sistema sanguíneo” de uma mina. As galerias que transportam ar limpo, como sendo as artérias, transportam oxigênio para as áreas de trabalho e os tubos de ventilação sendo as veias, conduzem os poluentes para serem expulsos para a atmosfera exterior. Sem um sistema de ventilação eficaz, nenhuma instalação subterrânea que requer pessoal para trabalhar na mesma, pode operar com segurança (MCPHERSON, 1993).

O massacre de homens, mulheres e crianças, que ocorreu nas minas de carvão da Grã-Bretanha durante os séculos XVIII e XIX resultou na teoria e na arte de ventilação tornando-se uma ciência primária de mineração. O sucesso da pesquisa nesta área tem produzido enormes melhorias nas condições ambientais subterrâneas. Perdas de vida atribuíveis à ventilação inadequada é agora, felizmente, uma ocorrência relativamente infrequente. Desmoronamentos, ao invés de fatores relacionados à ventilação, tornaram-se a causa mais comum de mortes e lesões em minas subterrâneas. As melhorias na ventilação também permitiram o melhoramento da produtividade nas minas. Nem as antigas, nem tão pouco, as mais avançadas máquinas motorizadas poderiam ter sido introduzidas no subsolo, sem um suprimento adequado de ar. Os sistemas de ventilação estão em uma contínua modificação. Sua função na mina permite a realização de escavação em rocha em quantidades cada vez maiores e em maiores profundidades também. Aquela, por sua vez, produz mais poeira, gases e calor, resultando em uma demanda ainda melhor pelo controle das condições ambientais do ambiente subterrâneo (MCPHERSON, 1993).

Fica patente a necessidade inquestionável do aumento do fornecimento de ar de ventilação na quantidade e qualidade adequadas. No passado, a avaliação e as análises das redes de ventilação eram restringidas pela enorme quantidade e complexidade de cálculos necessários para se determinar os parâmetros de controle (PINTO, COSTA, *et al.*).

Até o advento de programas de simulação computacional, que requerem a entrada de centenas de dados necessários para rodar a simulação de ventilação, não era incomum incorrer em erros, muitas vezes graves e, com isso, afetar não só a qualidade do ar devido à inadequações, como também a parte econômica do empreendimento. Isso quase sempre levava à ventilação deficiente ou à necessidade de correções e adaptações de porte durante a vida do empreendimento (GONÇALVES, PORTES, *et al.*, 2009).

A análise direta (tradicional) de circuitos de ventilação, portanto, é muito limitada, devido à complexidade e extensão dos cálculos envolvidos. Hoje, a análise e otimização de sistemas de ventilação envolve o uso de técnicas de simulação computacional. Desta forma, este trabalho apresenta as etapas para a construção de um modelo de simulação computacional do sistema de ventilação de uma mini-mina maquete, no software Ventsim, na sua versão para estudantes (GONÇALVES, PORTES, *et al.*, 2009).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 GERAL**

Dimensionar o sistema de ventilação de uma mina subterrânea em forma de maquete.

### **2.2 ESPECÍFICOS**

- Desenvolver o sistema de ventilação de uma mini-mina subterrânea.
- Simular os dados da ventilação no software Ventsim e compará-los com os dados reais obtidos através de medidas com anemômetro na maquete.
- Avaliar se os dados obtidos de vazão e velocidade do ar atendem aos requisitos da NR 22.

## **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1 A MINERAÇÃO E O CONTROLE DO AMBIENTE SUBTERRÂNEO**

Atualmente percebem-se tendências na indústria da mineração que demonstram que as minas subterrâneas tendem a ser mais profundas, de acesso muito mais difícil, o que aumenta os riscos do negócio. Por sua vez, as lavras em maiores profundidades exigem técnicas mais avançadas de mineração que propiciam o aumento de produtividade, em um esforço para alcançar margens satisfatórias de lucro. Inevitavelmente, a sofisticação dos métodos de lavra requer um aumento substancial da mecanização das atividades operacionais de lavra e desmonte. Assim, os veículos movidos a diesel são eleitos os preferidos por sua flexibilidade operacional e seu alto rendimento (MACHADO, 2011).

Um dos maiores impactos na ventilação das minas subterrâneas foi a introdução de equipamentos a diesel. Porém, esses equipamentos introduziram novos riscos relacionados com os subprodutos de sua combustão em ambientes confinados, os quais podem tornar irrespirável a atmosfera no interior das minas ou mesmo danosa à saúde dos trabalhadores, caso os controles adequados não sejam levados em consideração.

As empresas de mineração estão agora mais conscientes das pressões globais na manutenção do padrão de ventilação exigido pela legislação, bem como dos padrões internos da própria empresa. Esses padrões são obtidos através do dimensionamento e da implantação correta da quantidade de ar necessária para a diluição dos subprodutos, bem como da aquisição dos veículos com os menores índices de emissão de elementos particulados e gases, e da implementação correta da ventilação que satisfaça os padrões de segurança e saúde estabelecidos pela legislação.

Outro fator relevante é a crescente demanda para simular os vários cenários possíveis das condições de ventilação, utilizando-se métodos de mineração mais eficientes, que propiciem maior retorno dos investimentos, em um tempo mais curto, sem afetar a qualidade do ambiente subterrâneo, seja em condições normais de operação, seja em condições de emergências. Isso requer o planejamento de rotas de fugas, em que as pessoas ali presentes possam ser retiradas de forma ordenada e segura. Cada tipo de mina tem diferentes exigências de ventilação em termos de seu plano de lavra, *layout*, exigências legais, demandas de produção ao longo de sua vida útil e tipo de mineral a ser extraído. Esses estudos de cenários permitem prever com alto grau de precisão e com uma antecedência satisfatória as demandas práticas (MACHADO, 2011).

Os sistemas de ventilação de uma mina devem ser atualizados, redimensionados à medida que mudam as condições operacionais inicialmente consideradas.

Existem três desafios que afetam as operações em minas subterrâneas: primeiro, as minas estão se tornando cada vez mais profundas; segundo, elas estão cada vez mais mecanizadas; terceiro, os requisitos legais estão se tornando cada vez mais exigentes.

Do ponto de vista de ventilação, os efeitos principais da profundidade são o aumento do calor e a umidade, que levam as pessoas a concentrar sua atenção e a se tornar menos conscientes dos sinais visuais ao seu redor. Essas reduções levam eventualmente a um ponto em que o déficit de atenção é tal que compromete a segurança e a saúde dos trabalhadores com o aumento potencial para acidentes graves (GONÇALVES, PORTES, *et al.*, 2009).

Comprovadas as reservas em profundidade, existe a preocupação da mina com a operacionalidade do método de lavra e o posterior transporte do minério e estéril gerados, que exigem controles condizentes das condições ambientais. Os controles por excelência em minas subterrâneas são obtidos via ventilação adequada, que por sua vez é provida por ventiladores acionados por energia elétrica.

O aumento sistemático da demanda bem como dos custos de energia e a necessidade de planejar uma mina não só a curto prazo, mas também para a vida útil, bem como limitações de sua disponibilidade imediata requerem minas progressivamente mais profundas. Assim, demandam técnicas modernas e ferramentas adequadas para o dimensionamento dos sistemas de ventilação, que ofereçam confiabilidade e rapidez de análise. Isso permite estudar os vários cenários tanto nas situações cotidianas quanto para cenários acidentais.

Dada a complexidade das análises necessárias, justifica-se o emprego de ferramentas computacionais no planejamento de minas subterrâneas, o uso de aplicativos capazes de calcular com precisão adequada as condições termodinâmicas do ar e prever as temperaturas reinantes, as concentrações potencialmente perigosas de gases nos postos de trabalho, permitindo propor as melhores soluções para manutenção das condições ambientais ótimas seja através do uso de refrigeração, seja através do volume adequado de ventilação (PINTO, COSTA, *et al.*).

### 3.1 CONDICIONANTES DA ENGENHARIA AMBIENTAL SUBTERRÂNEA

O ar que circula nas galerias das minas subterrâneas sofre modificações relativas na sua composição química e física. Quando flui descendentemente em uma escavação de mina, o ar gera um aumento de pressão devido a seu próprio peso, e isso causa um aumento de temperatura correspondente a aproximadamente 1°C para cada cem metros na vertical (PINTO, COSTA, *et al.*).

Esse efeito termodinâmico provoca a diminuição da capacidade do ar em seu efeito de resfriamento. Além disso, o ar de ventilação incorpora gases, vapores, poeira e umidade resultantes das diversas atividades executadas. E, por ser um fluido compressível, sofre modificações significativas em sua densidade. Essa variação na sua composição química, na sua densidade e na sua temperatura demanda metodologias e ferramentas adequadas de controle das condições reinantes e são essenciais para se calcular as demandas futuras, à medida que a mina se aprofunda (MACHADO, 2011).

A energia necessária para movimentar a massa de ar requerida em subsolo é linearmente dependente das distâncias percorridas e, durante a sua movimentação, à custa da pressão total do sistema de ventilação, seja por atrito com a superfície interna das galerias (chamadas perdas  $H_f$ ), seja por turbulência decorrente de mudanças de direção em curvas, alargamentos e estreitamentos das galerias (chamadas perdas  $H_x$ ). Segundo HOWES e STOCKHAUS, 2002 cerca de 90% das perdas de carga ocorrem nos caminhos principais e de retorno da ventilação. Até o advento dos computadores, esses cálculos eram feitos manualmente e eram mais uma arte que uma ciência baseando-se fortemente na experiência do responsável pelo planejamento da mina.

Além disso, alta mecanização das minas oriunda dos modernos métodos de mineração, além do calor gerado, introduziu enormes quantidades de gases e calor no ambiente subterrâneo.

Uma tarefa crítica para a equipe responsável pelo planejamento de ventilação é determinar a quantidade de ar exigida para baixar a concentração de material particulado diesel até os limites permitidos, quando uma dada frota de equipamentos estiver em operação. Proporcionar um projeto adequado do sistema de ventilação da mina, que leve em consideração os equipamentos com as menores taxas de emissão, é a estratégia mais eficaz para reduzir essas concentrações. Porém, na maioria dos casos, não é possível trocar a frota existente por outra menos poluente devido aos altos custos envolvidos.

O uso generalizado de óleo diesel nas minas subterrâneas determina que os principais aplicativos usados no dimensionamento de circuitos de ventilação incorporem algoritmos seja para os cálculos de calor latente e calor sensível, seja para a simulação dos caminhos de ventilação, as concentrações de material particulado diesel, poeira ou gases de maneira a manter os limites de tolerância legais. Isso torna possível também antecipar condições de emergências e, conseqüentemente providenciar medidas mitigadoras (MACHADO, 2011).

Já o aumento da profundidade concomitante com o aumento dos volumes de ar circulante provoca o aumento inevitável das perdas de ar no circuito. Segundo O'NEIL, 1991, as perdas de ar são o maior fator de ineficiência nos sistemas de distribuição de ar de uma mina. O pior e o mais provável local onde tais perdas ocorrem são as instalações ou imediações dos ventiladores principais. O'Neil *et al.* (1991) referem ainda que essas perdas agem como um circuito paralelo de alta resistência com o circuito de ventilação principal desviando quantidades significativas de ar fresco diretamente para o retorno sem que o ar passe pelas frentes em serviço, onde ele é necessário. As perdas de ar podem ser minimizadas

com o planejamento adequado dos sistemas de ventilação e do uso judicioso de aplicativos computacionais que permitem otimizar os constituintes do sistema de ventilação.

Nas minas subterrâneas os trabalhos em profundidade ficam mais quentes, devido principalmente ao aumento da temperatura da rocha virgem com a profundidade, os impactos da autocompressão, bem como o calor liberado pelo maquinário utilizado. As fontes de calor em uma mina podem ser divididas em dois grupos distintos: o primeiro inclui as fontes que dependem do local geográfico da mina e, por conseguinte do extrato rochoso, e o segundo compreende fontes derivadas das atividades humanas (GONÇALVES, PORTES, *et al.*, 2009).

Do ponto de vista da engenharia, a determinação da quantidade de calor transmitida na unidade de tempo para um gradiente de temperatura especificado é um problema-chave. A taxa pela qual a energia é transferida da rocha para o ar é função da diferença de temperatura entre a superfície da rocha e a massa de ar, da rugosidade da superfície, da velocidade do ar, da porcentagem da superfície da rocha que está molhada e da pressão de vapor do ar de ventilação. A temperatura da rocha é função do gradiente térmico, da difusividade da rocha e do tempo de exposição (HALL, 1981).

A estimativa da carga térmica em minas profundas é o primeiro passo para atingir o objetivo de estimar taxas adequadas de vazão de ar e as necessidades de refrigeração em função dos parâmetros de conforto térmico. A carga térmica de uma dada mina é função da sua localização, dos equipamentos operacionais em funcionamento e dos demais processos geradores de calor que ocorrem no local (TUCK, 2011)

No contexto de exploração de bens minerais por lavra subterrânea de minas profundas, a ventilação destas deve haver planejamento cuidadoso, através da execução da modelagem computacional de sistemas de ventilação, seja em condições normais, seja em condições de emergências, em consonância com a responsabilidade institucional e social da preservação da saúde e segurança daqueles que trabalham em tais ambientes.

### 3.2 CIRCUITO BÁSICO DE VENTILAÇÃO

Além da ventilação natural, existem outros dois circuitos de ventilação: ventilação principal e ventilação secundária.

### 3.2.1 Circuito Principal

Utiliza os ventiladores principais que irão forçar o ar através do circuito de ventilação. Este circuito é formado por galerias de entrada de ar, galeria de retorno de ar impuro, e os tapumes, paredes, portas, pontes e reguladores que completam o sistema.

O circuito principal de ventilação tem como função conduzir o ar novo até as frentes de trabalho mais distantes na quantidade suficiente para atender as necessidades, devendo-se levar em consideração que para isso será necessário superar as resistências ao deslocamento do ar através das galerias e nos obstáculos como máquinas, obstruções por entupimento de galerias. Quanto maior for a resistência ao deslocamento do ar menor será a quantidade de ar impulsionada pelo ventilador. Outra função do circuito principal é a exaustão do ar impuro e pó das frentes de lavra, retornando pelas galerias de retorno e saindo pelo poço.

### 3.2.2 Circuito secundário

Utiliza os ventiladores, dutos e exaustores que transportam o ar nos painéis, nas frentes de trabalho.

A respeito do circuito secundário, este apresenta como função a condução através de dutos do ar puro e refrigerado pelas plantas até as frentes de trabalho. Este ar que é conduzido será utilizado na respiração do homem, diluição dos gases e diminuição da temperatura. Sua outra função é a exaustão do pó presente nas frentes de lavra e dos gases produzidos pelo desmonte de rocha (GONÇALVES, PORTES, *et al.*, 2009).

- Paredes: temporárias ou permanentes: São feitas de alvenaria, blocos de concreto, aço pré-fabricadas, ou outros materiais prova de fogo. O tamanho das paredes varia de acordo com as dimensões da entrada a ser tamponada. São instaladas em entrada de galerias e acessos não mais utilizados para evitar perdas de fluxo de ar.
- Reguladores: são comumente utilizados para reduzir o fluxo de ar a um valor desejado em vias de ventilação ou em uma seção qualquer da mina. Dependendo da sua permanência e da pressão a ser experimentada ao longo do regulador, o material usado na sua construção pode ser desde uma faixa simples de cortina, bloqueando a via de ventilação para a entrada de um realce.
- Portas de ar: quando é necessária a construção de acesso entre as vias de entrada e saída de ventilação e a pressão diferencial é alta, são construídas duas ou mais “Man-Doors” para

formar uma câmara de ar. Isso impede um curto-circuito quando uma porta é aberta para a passagem de pessoas ou equipamentos, A distância entre as portas deve ser capaz de acomodar o veículo mais longo que precisa passar pela câmara.

- Cortinas/ Mangas de ventilação: como medida de curto prazo, cortinas resistentes ao fogo podem ser pregadas ao teto, laterais e piso de minas de carvão, fornecendo paredes temporárias, onde as pressões diferenciais são baixas e em torno de áreas de trabalho. Em minas metálicas e não metálicas, mangas de ventilação são geralmente usados em torno das áreas de trabalho e para canalizar o ar fresco para as frentes de trabalho. Também são comumente utilizados junto com ventiladores auxiliares.
- Sprays de água e purificadores: são dispositivos utilizados para melhorar o fluxo de ar fresco em áreas de face. Purificadores são “aspiradores” utilizados para supressão de pó, enquanto que os sprays de água são colocados estrategicamente em máquinas e funcionam como “ventilador impulsionador” para redirecionar o fluxo de ar nas direções certas em áreas de face.

### 3.3 FERRAMENTAS PARA MODELAGEM COMPUTACIONAL

Os sistemas de ventilação principal de minas subterrâneas têm sido projetados, construídos e operados por décadas. Como a energia despendida não representava um custo operacional significativo, maiores cuidados não eram tomados na sua concepção, operação e manutenção.

Essa realidade mudou com o aprofundamento das minas, o aumento dos custos de energia, a necessidade cada vez maior de aumentar o volume de ar circulante devido ao aumento da mecanização, a necessidade de alcançar maior produtividade, as mudanças nas taxas de produção ou outras necessidades não antecipadas no projeto, além das exigências legais. O projeto de um sistema principal de ventilação subterrâneo e do sistema de controle ambiental é um processo muito complexo com muitas características interagindo, então não deve ser tratado isoladamente para evitar reformulações caras durante a vida útil da mina. Durante o estudo das várias fases de uma mina, deve-se sempre levar em consideração a máxima velocidade permitida ou a velocidade mais econômica do ar (MACHADO, 2011).

Critérios adicionais segundo McPherson (2008) para velocidades do ar aceitável e fluxos de ar em poços são os seguintes:

- Velocidade do ar de 10 m/s com base na área livre do poço. A área livre do poço é definida como a área líquida após a dedução da área ocupada por equipamentos e veículos de transporte do poço.
- A seção transversal do maior veículo de transporte no poço não deverá exceder 30% da área livre do poço onde existem dois ou mais meios de transporte, ou 50% da área livre do poço, onde há apenas um veículo de transporte.
- A velocidade máxima relativa do ar (com base na área livre) entre o fluxo de ar e o maior veículo de transporte não deve exceder 30 m/s, sem precauções especiais para proteger a estabilidade deste veículo de transporte, e não deve exceder 50 m/s em qualquer hipótese.

O propósito é minimizar as perdas de pressão no sistema de ventilação mantendo a eficiência e a segurança. A perda total é dada pela equação 1.1.

$$H_t = H_f + H_x \quad (1.1)$$

Onde:

$H_f$  são perdas por atrito;

$H_x$  são perdas por turbilhonamento.

As perdas  $H_f$  ocorrem por causa do atrito do ar contra as paredes das galerias ou dutos de ventilação. Elas são proporcionais às características físicas das vias de transporte do ar, portanto são “perdas lineares”. Elas são caracterizadas pela equação 1.2 conhecida, por equação de Atkinson.

$$H_f = k \frac{P L}{A^3} Q^2 \quad (1.2)$$

Onde, no sistema internacional de unidades (SI), tem-se:

$H_f$  em Pa ( $N/m^2$ );

$K$ , fator de atrito, dado em  $Ns^2m^{-4}$ ;

$P$ , perímetro da galeria, dado em m;

$L$ , comprimento da galeria, dado em m;

$A$ , área de seção da galeria, dada em  $m^2$ ;

$Q$ , vazão de ar, dada em  $m^3/s$

Na equação de Atkinson o fator de atrito  $k$  é um parâmetro importante para se obter a energia despendida pelo sistema e pode ser obtido em tabelas ou por meio de testes

conduzidos nos locais de interesse. Em geral, o valor de  $k$  apresenta-se entre 0,01 e 0,02  $\text{Ns}^2\text{m}^{-4}$  para galerias e entre 0,001 e 0,003 para dutos de ventilação (MCPHERSON, 1993).

As variáveis  $k$ ,  $P$  e  $L$  e  $A^3$  podem ser condensadas em um único parâmetro  $R$ , denominado “resistência de galeria”, segundo a equação 1.3.

$$R = k \frac{PL}{A^3} \quad (1.3)$$

Onde  $R$  é dado, no SI, em  $\text{Ns}^2\text{m}^{-8}$ .

Assim,  $H_f$  pode ser escrito como a equação 1.4.

$$H_f = RQ^2 \quad (1.4)$$

Em uma mina, galerias com  $R$  diferente encontram-se conectadas umas as outras. De acordo com a configuração da mina e o modo como são feitas as conexões, é possível encontrar um valor de  $R$  único representando todo o circuito de ar ou a “resistência equivalente” do circuito. Vê-se que a equação 1.4 representa uma equação do segundo grau, que inicia na origem.

Para determinar a resistência equivalente do circuito, é preciso simplificar as associações de galerias ou dutos de ventilação até um circuito único. Com isso, pode-se representar graficamente o comportamento de uma galeria ou duto de ar, ou conjunto de galerias ou dutos conectados entre si, o que leva a curva característica de uma galeria, segundo a Figura 1.

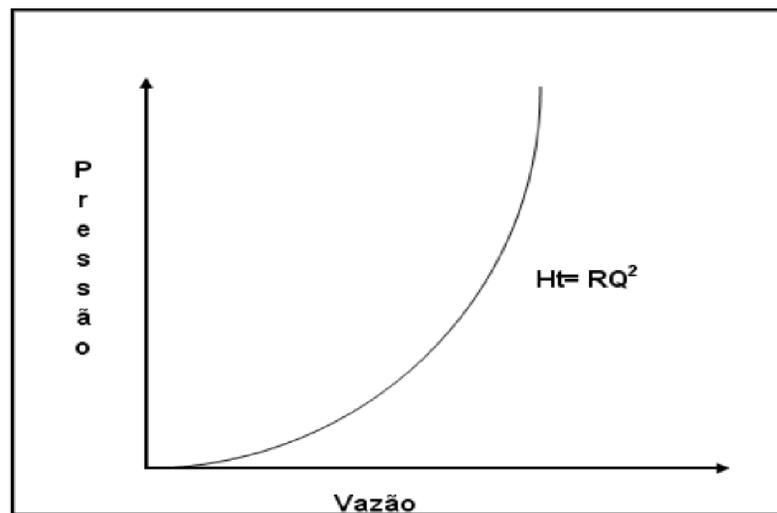


Figura 1. Curva característica de uma galeria.  
Fonte: (MACHADO, 2011).

No planejamento de sistemas de ventilação em mina subterrânea, especial atenção deve ser dada na determinação do parâmetro fator de atrito, cujo conhecimento é necessário para o cálculo das resistências à passagem do ar pelo circuito de ventilação e determinação, com precisão, dos ventiladores principais. (SALVADORETTI, COSTA e KOPPE, 2010). Isso pode se tornar extremamente trabalhoso ou até impraticável para minas com extensas malhas de ventilação, o que leva ao uso de modelamento computacional para se obter o R da mina.

O segundo grupo de parâmetro refere-se às perdas por turbilhonamento do ar ou perdas de pressão  $H_x$ . Esse é um tipo especial de perda de carga que inclui as perdas na entrada ou na saída do ar das galerias ou dutos de ventilação. Essas perdas por turbilhonamento ocorrem de forma abrupta e não são proporcionais ao comprimento das galerias ou dutos e são, portanto *perdas localizadas*. A obtenção de estimativas para  $H_x$  não é através de uma equação simples como  $H_f$ . Em geral, usam-se tabelas ou ábacos com valores originados experimentalmente. Perdas por turbilhonamento tipicamente respondem por 10% a 30% da resistência total da mina, com perdas de pressão por atrito respondendo pelas perdas restantes (HARTMAN, MUTMANSKY, *et al.*, 1991).

Segundo McPherson (2008), para determinar as perdas por choque produzidas por mudanças de direção, curvas, cruzamentos, obstruções e reguladores nos circuitos de entradas ou saídas das galerias, pode-se utilizar a técnica do fator de perdas de choque, em que se estabelece uma resistência equivalente de acordo com a geometria das galerias segundo as equações a seguir.

$$R_{equivalente} = R_{comprimento} + R_{choque} \quad (1.5)$$

Onde  $R_{comprimento}$  é dado pela equação de Atkinson (equação 1.6), corrigida pela densidade.

$$R_{comprimento} = k L \frac{\rho}{A^3} \quad (1.6)$$

E  $R_{choque}$  é dada pela equação 1.7.

$$R_{choque} = \frac{x \rho}{2 A^2} \quad (1.7)$$

Onde, no SI temos:

$X$ , fator de choque, adimensional;  
 $\rho$ , densidade do ar, em  $\text{kg/m}^3$ ;  
 $A$ , área seção reta, em  $\text{m}^2$ .

Pode-se também utilizar tabelas para as distintas situações, como a abaixo:

Tabela 1. Fatores de perdas de carga recomendados.

Exemplos de geometria de vias de ar	Fator X
Curva 90° seção quadrada $r/w = 1^*$	0,25
Curva 90° seção quadrada $r/w = 0,5$	1,3
Curva 90° seção redonda $r/d = 1$	0,2
Curva 90° seção redonda $r/d = 0,1$	1,1
Curva a 45° seção quadrada $r/w = 1$	0,15
Curva à 45° seção quadrada $r/w = 0,5$	0,78
Curva fechada a 45° seção quadrada $r/w = 1$	0,05
Curva aberta a 45° seção redonda $r/w = 0,5$	0,26
Desvio 45° cerrada seção redonda $r/w = 0,1$	0,66
Curva fechada a 45° seção redonda $r/w = 1$	0,12
Desvio suave 45° seção redonda $r/w = 0,1$	0,22
Curva aberta a 45° seção redonda $r/w = 1$	0,04
Entrada com bordo definido (ex. portal de injeção)	0,5
Entrada do duto	1
Entrada da boca de campana	0,03

Fonte: (MACHADO, 2011)

Além das perdas na pressão total causadas por atrito e as perdas por turbilhonamento, há as perdas decorrentes do *efeito sistema* (AMCA, 2009). O *efeito sistema* ocorre por causa das diferenças entre as conexões padronizadas usadas em testes de laboratório para realizar as avaliações de desempenho de um ventilador e as conexões de entrada e de saída instaladas nesse ventilador. Então, o *efeito sistema* é o resultado da diferença em como o ventilador foi testado, comparado como é instalado. Para minimizar o efeito sistema, as conexões de entrada e saída de uma instalação de ventilação devem ser cuidadosamente projetadas e montadas para criar um fluxo de entrada e saída o mais uniforme possível aproximando assim de uma instalação-padrão.

A importância da determinação precisa das perdas de pressão em um sistema de ventilação é vital uma vez que para haver determinada vazão através de uma galeria de ventilação, os ventiladores devem proporcionar pressão igual às perdas  $H_t$  sofridas pelo ar durante a movimentação.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve as metodologias utilizadas para coleta dos dados, bem como, os equipamentos utilizados. É feita também uma descrição do sistema de ventilação da mini-mina.

### 4.1 CONSTRUÇÃO DA MAQUETE

Para realização deste trabalho construiu-se uma maquete de uma mina subterrânea. A mini-mina apresenta três níveis em que as galerias representam as galerias principais de uma mina subterrânea, além das duas rampas que a compõem, e uma chaminé para ventilação.

A escolha do material para construção desta, isto é o gesso, deu-se devido ao fácil manuseio do mesmo e rápido tempo de secagem.

Nas figuras que se seguem, são ilustradas as etapas de construção da maquete.



Figura 2. Construção do nível 1 e rampa 1 da maquete.  
Fonte: Arquivo Pessoal.



Figura 3. Construção do nível 2 da maquete.  
Fonte: Arquivo Pessoal.



Figura 4. Construção da rampa 2 e nível 3 da maquete.  
Fonte: Arquivo Pessoal.



Figura 5. Construção do nível 3 e chaminé da maquete.  
Fonte: Arquivo Pessoal.

Além disso, foram usados como ventiladores da mini-mina cinco coolers <sup>1</sup> de computador de 12 volts cada, dispostos em dois conjuntos em paralelo, em que dois coolers com maior vazão compõem um conjunto em série, e outros três de menor vazão compõem outro também em série. Cada conjunto apresenta as mesmas vazão e velocidade.

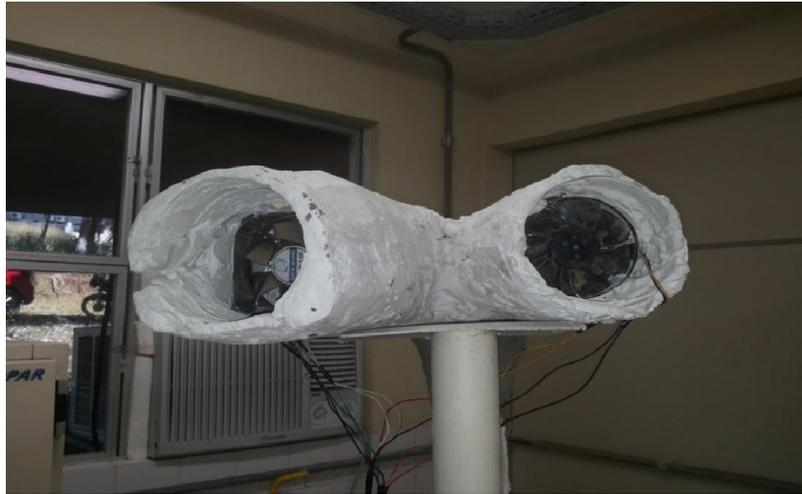


Figura 6. Ventiladores da mina.  
Fonte: Arquivo Pessoal.

Como se trata de uma representação de uma mina subterrânea assumiu-se a extração de um corpo mineral com direção LW e mergulho de 75°.

A figura a seguir apresenta uma visão geral da mina-maquete.



Figura 7. Visão geral da mina maquete.  
Fonte: Arquivo Pessoal.

---

<sup>1</sup> Cooler é um dispositivo de computador em forma de ventilador, utilizado para manutenção da temperatura adequada na máquina.

Para extração deste corpo mineral adotou-se uma operação hipotética com uso de equipamentos com as seguintes potências: perfuratriz de teto com 160cv, perfuratriz de frente com 232cv e 2 pás carregadeiras LHD com 250cv.

Para facilitar a análise dos dados, a maquete foi construída assumindo-se uma escala de 1:100.

Para concretização do modelo levou-se em consideração que a vazão fornecida pelos ventiladores da mina deva ser suficiente para o suprimento de ar nas frentes de trabalho. Como as atividades executadas de perfuração, carregamento, detonação e transporte, não ocorrem simultaneamente, pode-se afirmar que a vazão deve ser ideal para amenizar os gases emitidos pelas máquinas de cada atividade. Assim sendo, o valor de potência de maior relevância é aquele do equipamento de maior potência, isto é, das duas pás LHD.

O valor da potência do equipamento é levado em consideração e o número de pessoas em cada frente de trabalho baseado nos critérios estabelecidos na NR 22, em que deve-se atender a vazão mínima necessária para realização destas atividades conforme a equação:

$$Q_T = Q_1 * n_1 + Q_2 * n_2 \quad (1.8)$$

Onde:  $Q_T$  = vazão total de ar fresco em  $m^3/\text{min}$

$Q_1$  = quantidade de ar por pessoa em  $m^3/\text{min}$

(em minas de carvão =  $6,0 m^3/\text{min}$ ; em outras minas =  $2,0 m^3/\text{min}$ )

$n_1$  = número de pessoas no turno de trabalho

$Q_2$  =  $3,5 m^3 / \text{min}/\text{cv}$  (cavalo-vapor) dos motores a óleo diesel

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

A NR 22 utiliza-se de outros critérios para avaliação da quantidade de ar. Assim, pode-se obter uma quantidade de material que pode ser extraída com uma quantidade mínima de ar, conforme esta norma. A norma estabelece como mínimo uma quantidade de  $180 m^3$  de ar por minuto para cada 1000 toneladas extraídas mensalmente.

$$Q_T = q * T \quad (1.9)$$

Onde:  $Q_T$  = vazão total de ar fresco em  $m^3/\text{min}$

$q$  = vazão de ar em  $m^3/\text{minuto}$  para 1.000 toneladas desmontadas por mês

(mínimo de  $180 m^3/\text{minuto}/1.000$  toneladas por mês)

T = produção em toneladas desmontadas por mês.

Ainda baseado nesta norma pode-se obter uma máxima quantidade de explosivos correspondente à detonação de uma frente acordada com a aeração desta. Para esta situação assumiu-se um tempo de aeração de 20 minutos.

$$Q_T = \frac{0,5 \cdot A}{t} \quad (1.10)$$

Onde:  $Q_T$  = vazão total de ar fresco em  $m^3/min$

A = quantidade total em quilogramas de explosivos empregados por desmonte

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

## 4.2 EXECUÇÃO DAS MEDIDAS

A fim de validar o modelo computacional, executaram-se medidas de velocidade com anemômetro, em pontos estratégicos da maquete, isto é, no decorrer dos níveis, no centro das rampas e próximo aos ventiladores.

Para obtenção dos valores de vazão foram utilizados os valores das áreas dos pontos onde foram executadas as medidas, e desta forma fez-se o produto destas áreas por suas respectivas velocidades, a fim de se obter a vazão em cada ponto.

## 4.3 CONSTRUÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL

O software utilizado na construção do modelo de rede de fluxo do circuito de ventilação da mini-mina foi o VentSim na sua versão educacional. Este software permite a entrada de dados por uma interface gráfica de janelas com vários menus onde pode-se fazer a entrada dos dados via teclado ou mouse. Os dados podem ser exportados e importados por meio de arquivos com extensão dxf ou cfs.

A geometria do circuito de ventilação é estabelecida pela barra de tarefas do programa com a ajuda do utensílio desenho representado por um ícone lápis. Com ele pode-se traçar todo o diagrama, desenhando o circuito de ventilação com o mouse. Nessa etapa de confecção do diagrama deve-se estabelecer em que nível se encontra o circuito, e isto pode ser feito com o sub-ítem localizado no canto inferior esquerdo da barra de tarefas. A Figura 8 ilustra em maior detalhe a barra de tarefas do programa Ventsim.



Figura 8. Barra de tarefas do programa Ventsim.  
 Fonte: (PINTO, COSTA, *et al.*).

As características de cada seção de galeria do circuito de ventilação são definidas pelo ícone representado pela letra E em que, clicando sobre este e em seguida sobre uma determinada seção do circuito, abrirá uma janela representada pela Figura 9. Pode-se regular, neste ícone, as características relativas à forma, comprimento, resistência, rugosidade, etc.

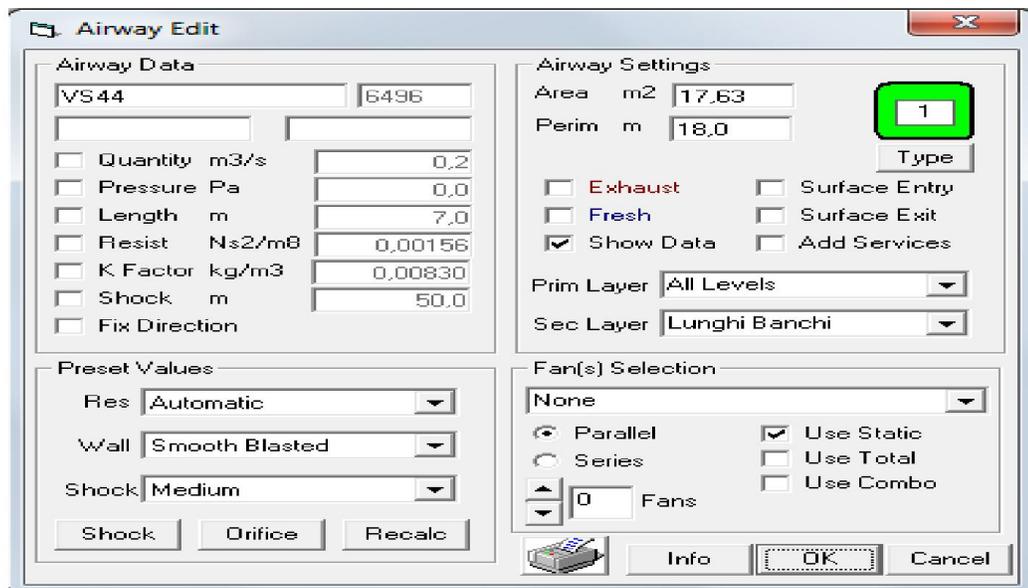


Figura 9. Janela de inserção de características do circuito.  
 Fonte: (PINTO, COSTA, *et al.*).

Informações relativas aos níveis, ventiladores e galerias são acessíveis através do menu principal Ferramentas (Tools), Figura 10. Quando escolhe-se uma das opções, tem-se acesso ao conteúdo e a edição. É possível modificar ou adicionar informações em seu conteúdo. As figuras (Figura 11, Figura 12, Figura 13) mostram as janelas de informações para cada item do menu Ferramentas.

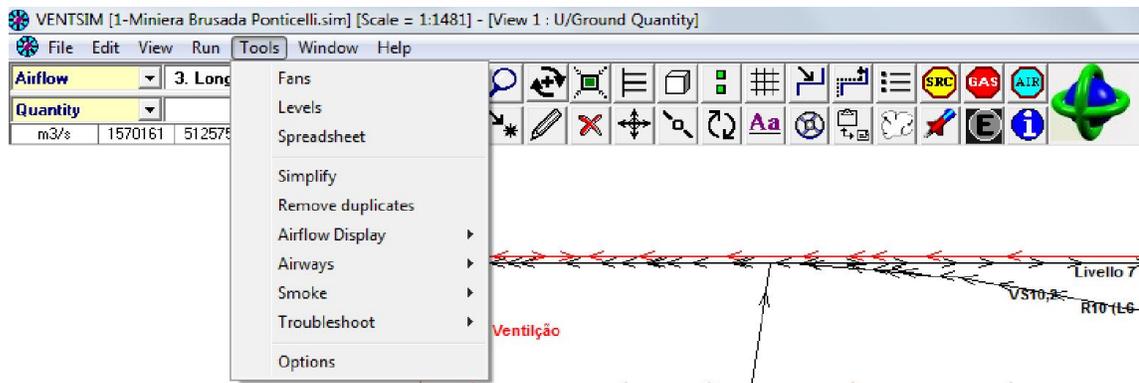


Figura 10. Item database do menu principal do software.  
 Fonte: (PINTO, COSTA, *et al.*).



Figura 11. Janela de edição para os níveis estabelecidos no diagrama de ventilação.  
 Fonte: (PINTO, COSTA, *et al.*).

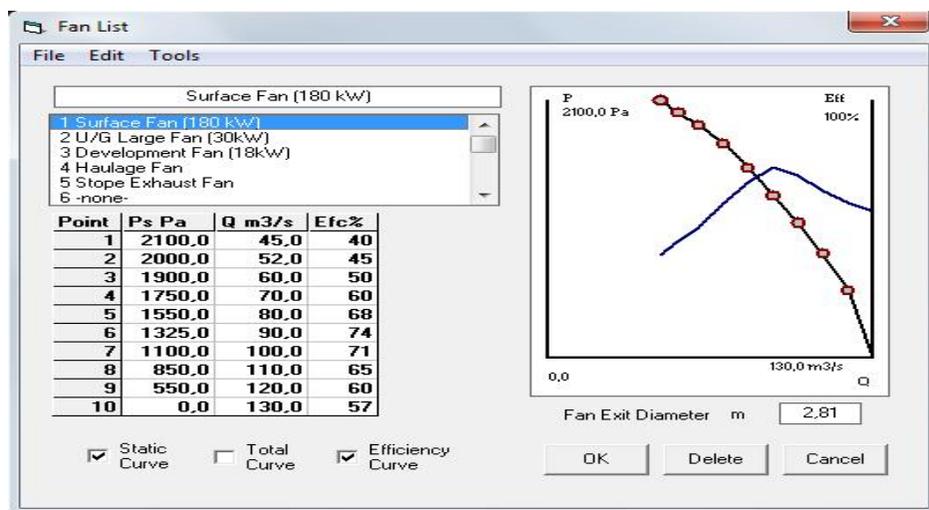


Figura 12. Janela de edição e inserção de dados sobre os ventiladores.  
 Fonte: (PINTO, COSTA, *et al.*).

No.	Name	From	To	Length	Flow	Vel	Pdrop	Resistance	K-Factor	Shock	Fan	F Pres	H
79	VS02B			52,0	1,633	0,7	0,5	0,0037177	0,00830	50,0			
85				40,0	30,0	1,9	3,6	0,0039614	0,00830	50,0			
87	VS02			66,0	30,0	1,9	4,6	0,0051129	0,00830	50,0			
91				18,0	30,0	2,0	3,2	0,0035118	0,00830	50,0			
93				76,0	30,0	2,0	5,9	0,0065384	0,00830	50,0			
99				25,0	30,0	2,0	3,5	0,0038758	0,00830	50,0			
103	VS01			141,0	30,0	2,0	8,9	0,0098805	0,00830	50,0			
107				34,0	30,0	2,0	3,9	0,0043635	0,00830	50,0			
855	VSR6,2			15,0	8,366	0,7	0,3	0,000841	0,00830	50,0			
856				15,0	8,366	0,7	0,3	0,0008389	0,00830	50,0			
857	VSR6			44,0	8,366	0,7	0,4	0,0012072	0,00830	50,0			
864				11,0	10,35	0,9	0,5	0,0051234	0,00830	50,0			
866				12,0	10,35	0,9	0,6	0,0052345	0,00830	50,0			
868				8,0	10,35	0,9	0,5	0,0048534	0,00830	50,0			
869	R3 (L0 - L1)			18,0	10,35	0,9	0,6	0,0057011	0,00830	50,0			
870				28,0	10,35	0,9	0,7	0,0065632	0,00830	50,0			
873	VSR3,1			21,0	10,35	0,9	0,6	0,0059911	0,00830	50,0			
876				39,0	10,35	0,9	0,8	0,007471	0,00830	50,0			
4849	VS11			52,0	8,366	1,1	1,1	0,0033409	0,00830	50,0			
4854				30,0	8,366	1,1	0,9	0,0026086	0,00830	50,0			
4857				10,0	8,366	1,1	0,7	0,0019827	0,00830	50,0			

Figura 13. Janela de visualização dos trechos estabelecidos com suas características.  
 Fonte: (PINTO, COSTA, *et al.*).

O programa VentSim calcula a resistência a partir de dados de rugosidade, comprimento e geometria da galeria. Pode-se também inserir um valor de resistência para uma dada galeria ou atribuir um valor padrão entre os disponíveis no software.

A solução numérica para o circuito de ventilação do fluxo de rede é ativada no botão AIR. Se o circuito de ventilação proposto contiver algumas incoerências como, trechos de galerias sem entrada ou desconectados, o programa notifica um erro, indicando o trecho de galeria que o possui. O programa retornará uma mensagem de erro, caso aconteça uma não convergência para o balanço de vazão ou uma eficiência muito baixa do sistema de ventilação.

Os resultados obtidos com o programa podem ser visualizados de diversas formas, como: vazão, pressão manométrica, velocidade, diferença de pressão e potência. Os resultados são visualizados junto ao circuito. A Figura 14 mostra o circuito de ventilação da mina-maquete traçado no programa VentSim.

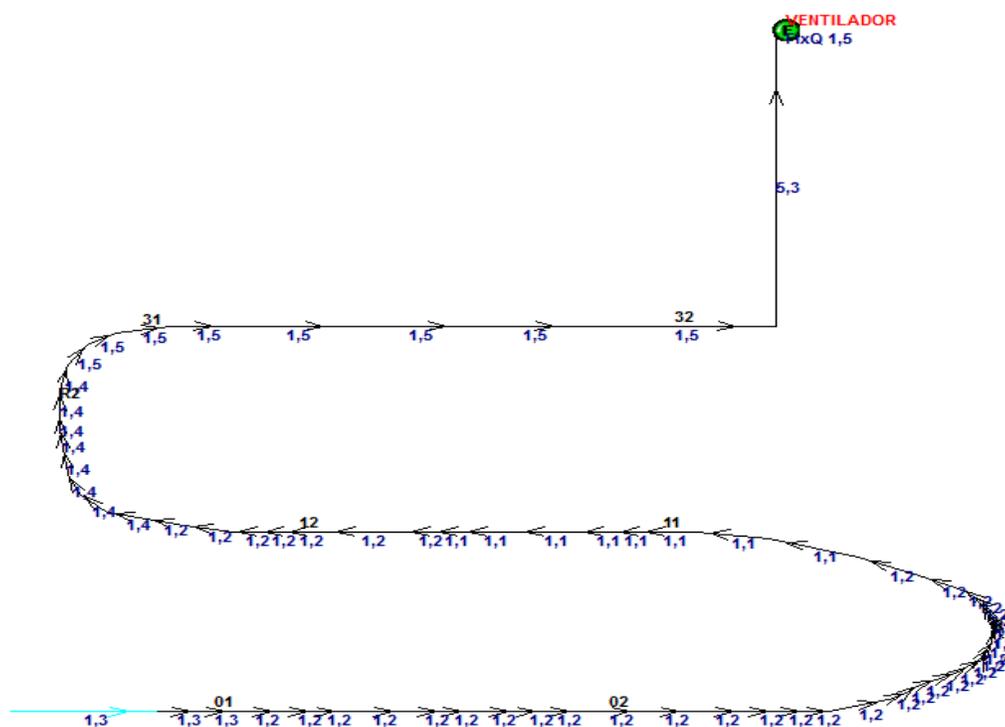


Figura 14. Circuito de ventilação construído no VentSim com uma simulação de fluxo de ar.  
 Fonte: Arquivo Pessoal.

Os modelos do circuito de ventilação são feitos com o intuito de caracterizar o layout corrente do circuito de ventilação e prever as possíveis distribuições de fluxo e de pressão nos futuros cenários minerários. Outro aspecto levado em consideração foi a adequação do atual circuito à Norma Regulamentadora NR 22.

Para validar o modelo de fluxo, os dados obtidos foram comparados com os dados simulados. A diferença entre os valores simulados e a média de todos os valores das medidas com anemômetro foi estabelecida como parâmetro para validação do modelo. Levou-se em consideração também o erro relativo entre os valores. Foram comparados os valores de velocidade nos pontos característicos do circuito: 01,02, R1, 11, 12, R2, 31,32 e próximo ao ventilador.

O propósito desta análise é caracterizar o circuito de ventilação e propor uma possível previsão das distribuições de vazão no atual cenário.

Em um caso real, um modelo do gênero pode servir para prever as futuras distribuições de vazão caso seja necessária uma reformulação do circuito de ventilação dentro de uma margem de erro estabelecida como aceitável.

Desta forma estabeleceu-se neste trabalho uma margem de erro aceitável de 5%, visto que trata-se de uma situação hipotética, e a mina-maquete apresenta apenas um único caminho do ar.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A velocidade é um parâmetro de importância, uma vez que seu controle está intimamente ligado à saúde ocupacional. Os resultados simulados foram comparados com os valores medidos e são apresentados na tabela a seguir, além dos erros relativos.

Tabela 2. Comparação dos valores de velocidade medidos e simulados.

	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Vel. Medida	Vel. Simulada	Erro Rel (%)
					Média		
0.1	1,5	1,3	1,2	1,1	1,28	1,3	1,92%
0.2	1,4	1,1	1,1	1,3	1,23	1,2	2,08%
R1	1,3	1,2	1,1	1,2	1,20	1,2	0,00%
11	1,3	1,1	1	1,1	1,13	1,1	2,27%
12	1	1,2	1,3	1,1	1,15	1,2	4,17%
R2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,35	1,4	3,57%
31	1,5	1,6	1,6	1,4	1,53	1,5	1,67%
32	1,6	1,5	1,4	1,4	1,48	1,5	1,67%
Ventilador	1,5	1,5	1,5	1,5	1,50	1,5	0,00%

De acordo com a NR 22, o valor limite para velocidade em lugares que exista circulação de pessoas deve estar acima de 0,20 m/s e abaixo de 8,00 m/s. Como mostrado na tabela anterior, os valores medidos se encontram dentro do limite exigido pela norma e os resultados da simulação apresentam uma diferença inferior a 5%. A vazão encontrada em todos os pontos da mina foi de 67 m<sup>3</sup>/s, conforme a figura abaixo.

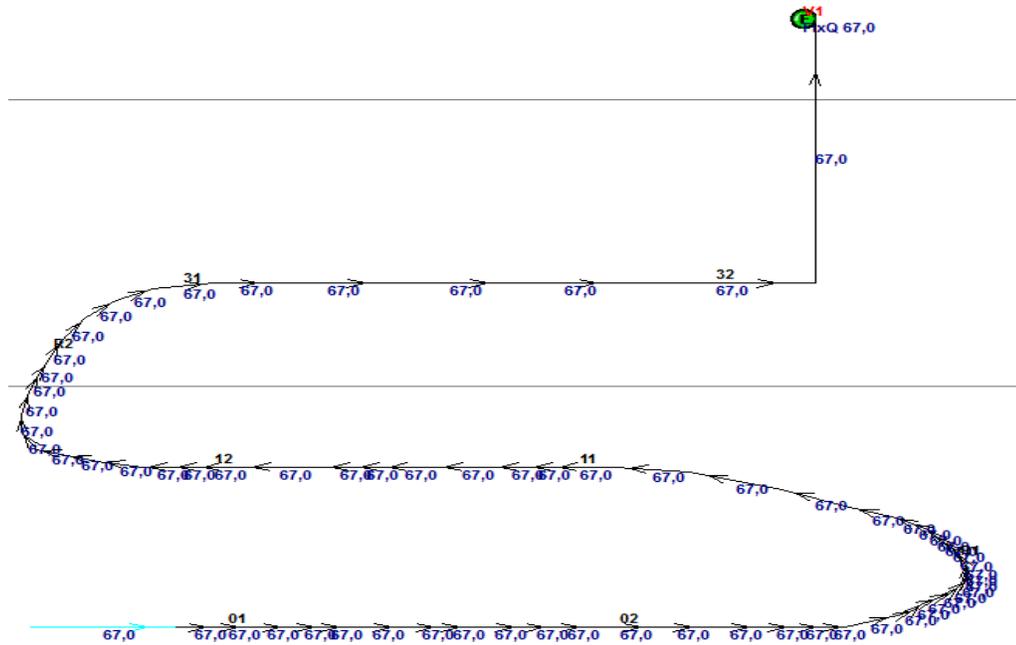


Figura 15. Simulação do circuito de ventilação da mina maquete apresentando a vazão constante.  
 Fonte: Arquivo Pessoal.

Os gráficos que se seguem representam uma comparação dos valores medidos de velocidade com os valores simulados no Ventsim e os erros relativos encontrados em cada ponto.

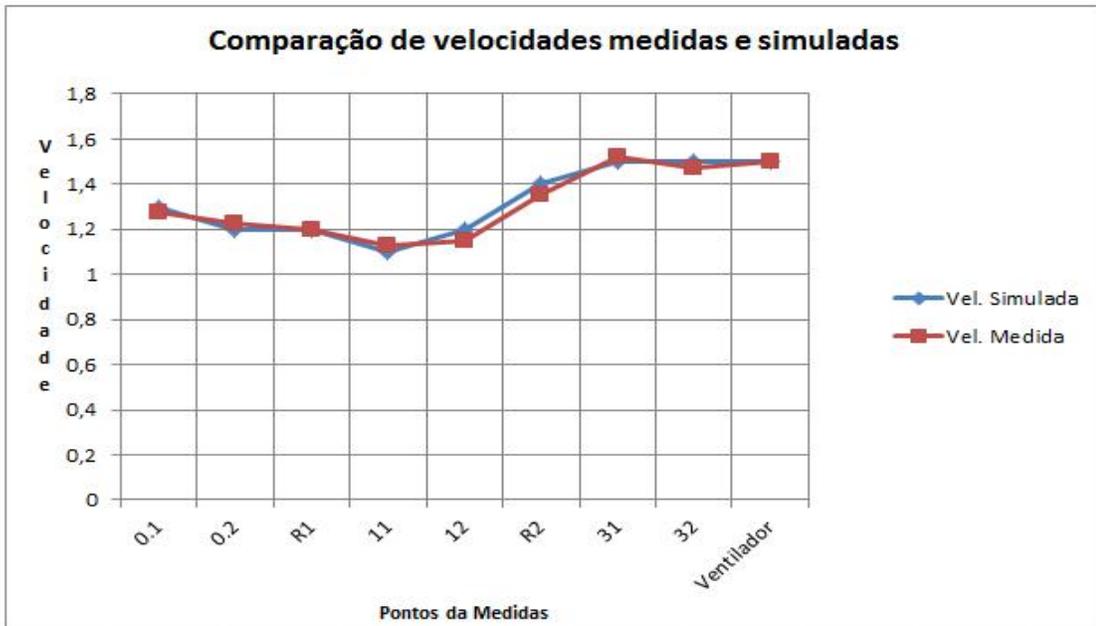


Figura 16. Validação entre os valores de velocidade medidos e simulados.

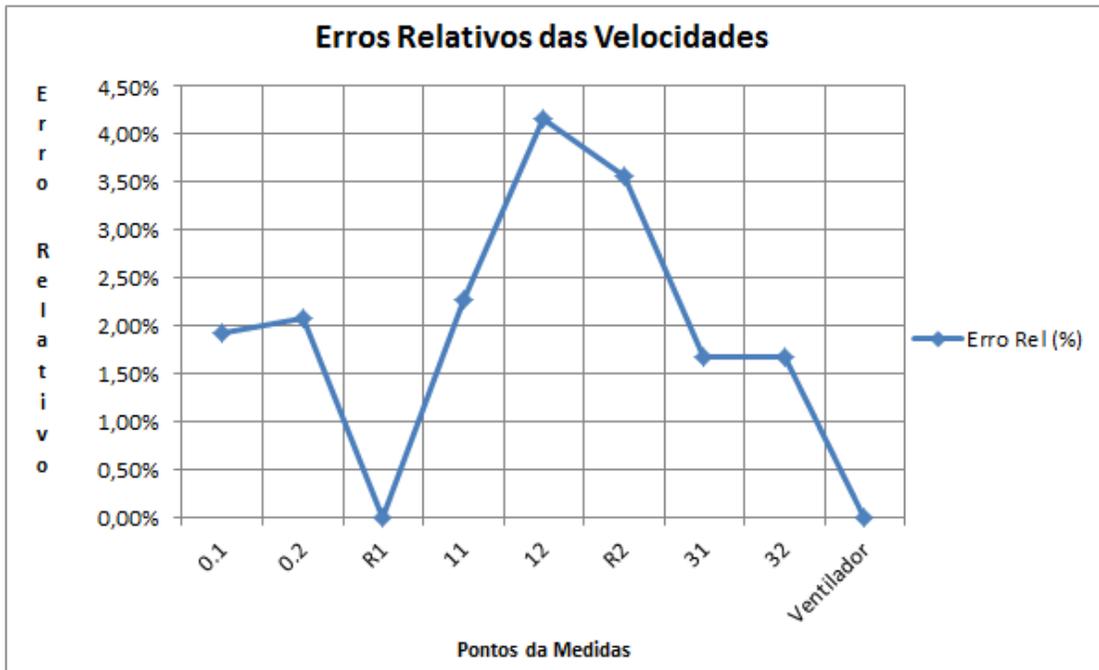


Figura 17. Erro relativo dos dados medidos e simulados.

De acordo com o parâmetro estabelecido como critério de validação do modelo, este encontra-se dentro da margem de erro estabelecida.

O somatório de todas as vazões em um circuito de ventilação é constante. Nota-se que para este caso, por se tratar de uma situação de laboratório, a mina apresenta um único caminho, isto é, em qualquer trecho da maquete a vazão será a mesma. Isto significa que os parâmetros que irão variar são as seções dos trechos de galeria em que foram realizadas as medidas e as velocidades do ar.

Conforme a NR 22, e considerando esta situação hipotética, obtém-se o valor de vazão necessária de acordo com o critério de número de máquinas e admitindo-se um valor de três pessoas:

$$Q_T = \frac{2 * 3 + 3,5 * 2 * 250}{60}$$

$$Q_T = 30 \text{ m}^3/\text{s}$$

Isto mostra que a vazão fornecida pelos ventiladores é suficiente para atender aos equipamentos da mina e ao mesmo tempo às exigências da norma.

Outro parâmetro que pode ser avaliado neste trabalho e ainda de acordo com as exigências da NR 22 é a vazão de ar fresco na mina em função da tonelagem mensal desmontada:

$$T = \frac{67 * 60 * 1000}{180}$$

Assim sendo obtém-se uma tonelagem mensal que pode ser extraída com o mínimo que vazão requerida ( $180\text{m}^3/\text{min}$  para cada 1000 toneladas extraídas) de 22.333 toneladas.

## 6 CONCLUSÃO

A ventilação em uma mina tem como principal objetivo o fornecimento do fluxo de ar puro a todos os locais de trabalho em subsolo, em quantidades suficientes para assegurar as condições de higiene e segurança dos trabalhadores. Os sistemas de ventilação e refrigeração estão entre principais investimentos de uma mina subterrânea, sendo fator imprescindível no planejamento econômico e de viabilidade do empreendimento mineiro. Sendo assim, é de suma importância que engenheiro de minas possua um vasto conhecimento sobre circuito de ventilação, suas utilidades, os equipamentos empregados, bem como seu manuseio. Para que este seja empregado e utilizado adequadamente a fim de evitar qualquer tipo de dano à saúde dos trabalhadores, ou acidente que possa ocorrer.

A metodologia do estudo adotada mostrou resultados pertinentes na avaliação das condições ambientais do ar da atmosfera da mina maquete. Conclui-se a partir da comparação dos valores medidos com os valores limites admissíveis calculados a partir da NR 22 que os valores de velocidade do vento são atendíveis a maior parte das minas subterrâneas. Os valores de velocidade medidos se mostram todos abaixo dos valores mínimos admissíveis pela NR 22.

No que diz respeito à simulação do circuito de ventilação com o uso do software VentSim, o comparativo entre os valores de velocidade de ar medidos e simulados variam de 1,67% à 4,17%, o que demonstra que a situação de referência simulada tem uma validade aceitável. A construção de modelos computacionais de simulação para o circuito de ventilação constitui-se em ferramenta importante de projeto. Além de agilizar a tomada de decisões, possibilita a previsão das possíveis demandas de vazão para diferentes layouts de circuito. Diminuindo os custos e racionalizando os recursos disponíveis.

## **7 RECOMENDAÇÕES**

Sugere-se a simulação de um contaminante na atmosfera da mina maquete.

Sugere-se também que os próximos trabalhos sejam realizados na versão do software mais atualizada: VentSim Visual.

## REFERÊNCIAS

AMCA. **System Effects - Air Movement & Control Association International, Inc.** 2009.

GONÇALVES, B. M. G. et al. **Ventilação em Mina Subterrânea.** João Molevande. 2009.

HALL, C. J. **Mine Ventilation Engineering.** Society of Mining Engineers of The American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers. New York: Inc. New York. 1981.

HARTMAN, H. L. et al. **Mine Ventilation and Ar Conditioning.** 2nd Edition Reprint with corrections. ed. Wiley-Interscience, 1991.

HOWES, M. J.; STOCKHAUS, F. J. **Onapping Depth Project - Ventilation and Cooling Planning for Mining to 2600 m below surface - Mine ventilation: proceedings of the North American/Ninth US Mine.** 2002.

MACHADO, H. G. **Gestão de riscos em minas subterrâneas - Avaliação da ventilação de minas profundas.** Ouro Preto. 2011.

MCPHERSON, M. J. **Subsurface Ventilation and Environmental Engineering.** New York. 1993.

O'NEIL, T. J. **Metal Mine Ventilation System. Chapter 14 Mine Ventilation and air Conditioning.** 2nd Ed. 1991.

PINTO, P. C. et al. **Construção de um modelo computacional para o circuito de ventilação da mina Esperança-SC.** Treviso.

SALVADORETTI, P.; COSTA, J. F. C. L.; KOPPE, J. C. **Estimando valores para o fator de atrito em circuitos de ventilação da Mina Nova e Mina III - Crixás.** 2010.

SANTOS, M. D. S. **Avaliação das Condições Ambientais do Circuito de Ventilação da Mina Santa Maria.** Catalão. 2013.

TUCK, M. **Ventilation Deep Mines - Time for a Rethink of Ventilation Design.** 13th MINE VENTILATION CONGRESS. 2011.