

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CAMPUS II
MESTRADO EM ENGENHARIA DE MINAS**

**ANÁLISE DE REDES DE VENTILAÇÃO DE MINAS
ESTUDO DE CASO – MINA MEDRADO – BA**

JOSÉ CESAR DE ALBUQUERQUE COSTA

**CAMPINA GRANDE PB
1998**

ANÁLISE DE REDES DE VENTILAÇÃO DE MINAS
ESTUDO DE CASO – MINA MEDRADO – BA

JOSÉ CESAR DE ALBUQUERQUE COSTA

**ANÁLISE DE REDES DE VENTILAÇÃO DE MINAS ESTUDO DE CASO
MINA MEDRADO - BA**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado em Engenharia de Minas da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, como requisito parcial á obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas.

Área de concentração: Lavra de Minas

Orientador: Prof. Dr. Aarão de Andrade Lima

Campina Grande
1998



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCC

B333a

2009 Batista, Fábio Giovanni de Araújo.

Avaliação dos níveis de metais pesados no corpo aquático do Açude Velho, Campina Grande - PB /Fábio Giovanni de Araújo Batista. — Campina Grande, 2009.

64 f.: il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Referências.

Orientador: Prof. Dr. José Avelino Freire.

1. Poluição Química. 2. Açude. 3. Garrafas PET. 4. Efluentes Urbanos. I. Título.

CDU 632.15(043)

**PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DO
ALUNO
JOSÉ CESAR DE ALBUQUERQUE COSTA**

**TÍTULO: ANÁLISE DE REDES DE VENTILAÇÃO DE MINAS ESTUDO DE
CASO MINA MEDRADO – BA**

COMISSÃO EXAMINADORA:

ASSINATURA:

DR. AARÃO DE ANDRADE LIMA

Aarão de Andrade Lima

DR. EDUARDO JORGE LIRA BONATES

Eduardo Jorge Lira Bonates

DR. SÉRGIO MÉDICI DE ESTON

Sérgio Médici de Eston

CAMPINA GRANDE, 29 DE DEZEMBRO DE 1998

*Aos meus pais, Joaquim José da Fonseca
Costa (in memoriam) e Neusa de Medeiros
Costa, que sempre tiveram como meta de vida
a formação acadêmica e moral de seus filhos,
dedico este trabalho.*

AGRADECIMENTOS

À minha esposa, Maria Amélia, aos meus filhos e todos os amigos pelo constante incentivo.

Ao meu orientador e amigo Prof. Dr. Aarão de Andrade Lima pela dedicada, paciente e imprescindível orientação em todas as etapas da pesquisa.

Ao Prof. Dr. Eduardo Bonates pelo empenho na procura e obtenção, junto a MacGill University-Canadá, do programa aplicativo que viria servir de base para este trabalho.

Ao Prof. Dr. Sérgio Médici de Eston pelas valiosas sugestões que tanto contribuíram para o aperfeiçoamento deste trabalho.

Ao Prof. Arlindo Bazante pela prestimosa ajuda nos trabalhos de editoração.

À Empresa Ferbasa, na pessoa do Dr. Carlos Humberto, por disponibilizar suas instalações para a execução prática da pesquisa, a todos os que fazem o corpo técnico da Empresa pelo apoio e amizade dispensados, e, de forma muito especial, ao Engenheiro Wanderley Lins de Oliveira, que muito contribuiu com sua experiência profissional, pelo tempo que dedicou às nossas discussões de ordem técnica e pelo apoio amigo.

A todos os que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho apresento os meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

	pág
LISTA DE FIGURAS.....	xi
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 JUSTIFICATIVA.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 METODOLOGIA.....	3
1.4 ABRANGÊNCIA.....	3
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	5
2.1 FONTES DE FLUXO DE AR NAS MINAS.....	5
2.2 COMPORTAMENTO DO FLUXO DE AR EM MINAS.....	6
2.2.1 A EQUAÇÃO DE CONTINUIDADE OU CONSERVAÇÃO DE MASSA.....	6
2.2.2 A EQUAÇÃO DE ENERGIA.....	7
2.2.3 PRESSÕES ESTÁTICA, DINÂMICA E TOTAL.....	8
2.2.4 A EQUAÇÃO DE BERNOULLI EM VENTILAÇÃO DE MINA.....	8
2.2.5 NÚMERO DE REYNOLDS.....	10
2.3 RESISTÊNCIA À VENTILAÇÃO.....	11
2.3.1 PERDA DE PRESSÃO POR FRICÇÃO.....	12
2.3.2 O FATOR DE FRICÇÃO.....	13
2.3.3 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA.....	14
2.3.4 PERDAS DE PRESSÃO POR CHOQUE.....	14
2.3.5 PERDA TOTAL DE PRESSÃO.....	16
2.4 POTÊNCIA DO AR.....	17
2.5 CIRCUITOS DE VENTILAÇÃO.....	18
2.5.1 CIRCUITOS EM SÉRIE.....	18

2.5.2	CIRCUITOS EM PARALELO	20
2.6	OPERAÇÃO DE VENTILADORES.....	22
2.6.1	PRESSÃO DO VENTILADOR.....	23
2.6.2	POTÊNCIA E EFICIÊNCIA DO VENTILADOR.....	24
2.6.3	TIPOS DE VENTILADORES.....	26
2.6.4	LEIS DO VENTILADOR.....	28
2.6.5	SELEÇÃO DE VENTILADORES.....	29
2.6.6	PONTO DE OPERAÇÃO DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO	31
2.6.7	COMBINAÇÃO DE VENTILADORES	32
2.6.8	COMBINAÇÃO DE VENTILADORES COM VENTILAÇÃO NATURAL.....	33
CAPÍTULO 3	– ANÁLISE NUMÉRICA DE REDES DE VENTILAÇÃO	35
3.1	- TERMINOLOGIA DAS REDES DE VENTILAÇÃO	36
3.2	AS LEIS DE KIRCHHOFF PARA REDES DE VENTILAÇÃO	37
3.3	MÉTODOS PARA SOLUÇÃO DE REDES DE VENTILAÇÃO	38
3.3.1	MÉTODO DAS RESISTÊNCIAS EQUIVALENTES.....	38
3.3.2	MÉTODO DA ANÁLISE DIRETA	39
3.3.3	MÉTODO DA ANÁLISE DE HARDY-CROSS	40
3.4	UTILIZAÇÃO DE COMPUTADORES NA ANÁLISE DE REDES.....	45
3.4.1	DADOS DE ENTRADA	46
3.4.1.1	SOBRE A REDE BÁSICA DE VENTILAÇÃO	46
3.4.1.2	SOBRE OS VENTILADORES.....	46
3.4.1.3	SOBRE AS PRESSÕES DE VENTILAÇÃO NATURAL (NVP)	47
3.4.1.4	SOBRE AS MODIFICAÇÕES PARA CADA ENSAIO.....	47
3.4.2	SELEÇÃO DE MALHAS	47
3.4.3	O PROCEDIMENTO ITERATIVO	48
3.4.4	RAMOS COM VENTILADORES	48
3.4.5	RAMOS COM FLUXO DETERMINADO.....	49
3.4.6	SAÍDA DOS RESULTADOS	50
3.4.7	MODIFICAÇÕES NA REDE	50
3.5	ESCOLHA E USO DE PROGRAMAS DE VENTILAÇÃO DE MINAS	51

CAPÍTULO 4 – DESCRIÇÃO DOS PROGRAMAS UTILIZADOS	52
4.1 PROGRAMA DA MAPAO.....	52
4.1.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA.....	53
4.1.2 TIPOS DE RAMO	54
4.1.3 CONVENÇÕES DE SINAL	54
4.1.4 RESTRIÇÕES AO CIRCUITO	55
4.1.5 O CONTROLE DO PROGRAMA	55
4.1.6 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE EXECUÇÃO.....	56
4.1.7 DEFINIÇÃO DOS RAMOS.....	58
4.1.8 - DEFINIÇÃO DOS VENTILADORES	59
4.1.9 MUDANÇAS NO CIRCUITO	60
4.1.10 OPÇÃO TERMODINÂMICA.....	61
4.1.11 O ARQUIVO DOS RESULTADOS	61
4.1.12 - PROCEDIMENTOS PRÁTICOS	63
4.2 PROGRAMA VENTSIM®.....	63
4.2.1 PLATAFORMA	63
4.2.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS.....	64
4.2.3 ENTRADA DE DADOS	65
4.2.4 EXECUÇÃO DO PROGRAMA.....	67
4.2.5 RESULTADOS	67
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS E MEDIÇÕES	69
5.1 DADOS GERAIS SOBRE A MINA MEDRADO.....	69
5.1.1 CARACTERÍSTICAS DA LAVRA	70
5.1.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO	72
5.2 MEDIÇÕES EFETUADAS NA MINA	75
5.3 PARÂMETROS DO CIRCUITO.....	76
5.3.1 FATORES DE FRICÇÃO	76
5.3.2 RESISTÊNCIAS UNITÁRIAS.....	77
5.4 ANÁLISE DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO ANTERIOR.....	78
5.4.1 RESULTADO DAS MEDIÇÕES	78

5.4.2 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO CIRCUITO	79
5.4.3 RESISTÊNCIAS DOS RAMOS.....	81
5.4.4 COMPRIMENTOS DOS RAMOS.....	81
5.4.5 OS DADOS DE ENTRADA E A EXECUÇÃO DO PROGRAMA	81
5.4.6 OS DADOS DE SAÍDA E A ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	83
5.4.7 COMPARAÇÃO ENTRE AS VAZÕES MEDIDAS E AS CALCULADAS PELO PROGRAMA	84
5.5 ANÁLISE DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO ATUAL.....	84
5.5.1 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES	85
5.5.2 REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE CIRCUITO	85
5.5.3 DADOS DE ENTRADA DO PROGRAMA VENTSIM	86
5.5.4 DADOS DE SAÍDA DO PROGRAMA VENTSIM.....	86
5.5.5 COMPARAÇÃO ENTRE AS VAZÕES MEDIDAS E AS CALCULADAS PELO PROGRAMA.....	86
5.6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	87
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
ANEXOS	

LISTA DE FIGURAS

		pág
FIGURA 2.1	CURVA CARACTERÍSTICA DE MINA OU GALERIA	17
FIGURA 2.2	FORMAS DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE ACORDO COM A RESISTÊNCIA DO SISTEMA	17
FIGURA 2.3	CARACTERÍSTICAS DO CIRCUITO EM SÉRIE	19
FIGURA 2.4	CURVAS CARACTERÍSTICAS INDIVIDUAIS E RESULTANTE DE GALERIAS EM SÉRIE	20
FIGURA 2.5	CARACTERÍSTICAS DO CIRCUITO EM PARALELO	21
FIGURA 2.6	CURVAS CARACTERÍSTICAS INDIVIDUAIS E RESULTANTE DE GALERIAS CONECTADAS EM PARALELO	22
FIGURA 2.7	CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UM VENTILADOR	25
FIGURA 2.8	ELEMENTOS BÁSICOS DE UM VENTILADOR CENTRÍFUGO	26
FIGURA 2.9	TIPOS DE LAMINAÇÃO DO IMPULSOR NOS VENTILADORES CENTRÍFUGOS	27
FIGURA 2.10	ELEMENTOS BÁSICOS DE UM VENTILADOR DE FLUXO AXIAL	28
FIGURA 2.11	CURVAS DE VELOCIDADE ESPECÍFICA VERSUS EFICIÊNCIA DE VÁRIOS TIPOS DE VENTILADORES	30
FIGURA 2.12	DETERMINAÇÃO DO PONTO DE OPERAÇÃO DO VENTILADOR	31
FIGURA 2.13	CURVA CARACTERÍSTICA DE DOIS VENTILADORES CONECTADOS EM SÉRIE	32
FIGURA 2.14	CURVA CARACTERÍSTICA DE DOIS VENTILADORES CONECTADOS EM PARALELO	33
FIGURA 2.15	CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UM SISTEMA COMBINADO DE VENTILAÇÃO NATURAL E MECÂNICA	34
FIGURA 3.1	PRINCIPAIS ELEMENTOS DE UMA REDE DE VENTILAÇÃO	36
FIGURA 3.2	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO MÉTODO DE ANÁLISE DE HARDY-CROSS	41
FIGURA 3.3	FLUXOGRAMA DE UM PROGRAMA DE ANÁLISE DE REDE DE VENTILAÇÃO PELO MÉTODO DE HARDY-CROSS	45

FIGURA 4.1	CURVA CARACTERÍSTICA DE VENTILADOR	60
FIGURA 4.2	AMBIENTE INTEGRADO DO PROGRAMA VENTSIM (STUART, 1998).....	64
FIGURA 4.3	DADOS SOBRE UMA REDE DE VENTILAÇÃO EM FORMA DE PLANILHA DO VENTSIM.....	65
FIGURA 4.4	DADOS PARA DEFINIÇÃO DE NÍVEIS EM FORMA DE PLANILHA DO VENTSIM...	66
FIGURA 4.5	DADOS PARA DEFINIÇÃO DE CURVAS DE VENTILADORES EM FORMA DE PLANILHA DO VENTSIM	66
FIGURA 4.6	SAÍDA DO PROGRAMA VENTSIM MOSTRANDO FLUXOS DE AR	68
FIGURA 5.1	VISTA TRIDIMENSIONAL DA MINA MEDRADO	71
FIGURA 5.2	DETALHE DO CIRCUITO DE VENTILAÇÃO DA MINA MEDRADO USANDO O SISTEMA SOPRANTE	73
FIGURA 5.3	CIRCUITO DE VENTILAÇÃO POR SUCCÃO ATUALMENTE UTILIZADO NA MINA MEDRADO	74
FIGURA 5.4	DUTO DE VENTILAÇÃO	75
FIGURA 5.5	DESENHO ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO DE VENTILAÇÃO DA MINA MEDRADO	80

RESUMO

As técnicas de análise de redes de ventilação de minas se propõem a resolver problemas de distribuição do fluxo de ar tanto para projetos a serem implantados como para atender modificações em projetos já em operação. Esta pesquisa de análise de redes de ventilação é desenvolvida através de estudo de caso realizado na Mina Medrado da Mineração Vale do Jacurici, localizada no município de Andorinha-BA. O estudo combina a emprego de técnicas de análise, com a utilização de programas computacionais, com verificação dos resultados através de medições de vazões em diversos setores da mina. Em uma primeira etapa foi realizada a análise do sistema de ventilação por insuflamento, adotado na mina Medrado até Março de 1998, onde se utilizou o programa desenvolvido pela Mines Accident Prevention Association of Ontário (MAPAO) escrito em linguagem FORTRAN. Oportunamente com a mudança do sistema de ventilação da mina Medrado em Março de 1998, onde a corrente de ventilação geral é gerada por sucção, nova análise foi realizada utilizando-se, desta feita, o programa VentSim de origem australiana. Finalmente são estabelecidas comparações entre os dois sistemas de ventilação analisados, com base no fluxo de ar total, potência consumida, e distribuição do ar nos pontos críticos da mina.

ABSTRACT

Mine ventilation network analysis is a useful technique for solving air flow problems both in new projects and at operating mines. The present research, which encompasses mine ventilation network analysis, has been developed through a case study conducted at Medrado Mine. Medrado Mine is located in Andorinha County, Bahia State, Brazil, and is owned by Vale do Jacurici Mining Company. The study combines the use of ventilation network analysis with the use of computer programs, and validation of results by means of air flow measurements at several sectors of the mine. In a first stage, the analysis was done for a blowing ventilation system, which was adopted at Medrado Mine until March of 1998. In that stage, a computer program written in FORTRAN language was used. That program was developed by the Mines Accident Prevention Agency Association Ontario – MAPAO, Canada. Afterwards, a suction ventilation system was adopted in the mine, and the new analysis was performed using VentSim software, which has been developed in Australia. A comparison is made between both the blowing and suction ventilation systems, based on total air flow, power consumption, and air flow distribution at some critical locations of the mine.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

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 este interesse. Por outro lado, a disponibilidade de instrumentos para a 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, justificam 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 foram superadas na presente década 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 otimização 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. No passado foram usados modelos analógicos, ou modelos em escala reduzida, havendo estes sido totalmente suplantados pela disseminação de métodos numéricos com base computacional.

Por outro lado, nota-se que estas modernas facilidades de análise não tem sido plenamente difundidas a curto prazo no setor produtivo, a nível nacional.

Merece destaque o fato 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 o aprofundamento das minas, e com o aumento e a complexidade das escavações, quando torna-se comum a existência de diversas frentes de lavra em produção simultânea.

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 OBJETIVOS

Esta pesquisa tem o objetivo principal de desenvolver estudo combinando a utilização de técnicas numéricas implantadas em computadores, com verificação dos resultados através de medições de vazões, com vistas ao dimensionamento de sistemas de ventilação de minas. Paralelamente busca-se estabelecer comparação entre sistema de ventilação por insuflamento com uso de dutos na rede principal, com o sistema por sucção, para o método de desabamento em subníveis (*sublevel caving*).

Esta pesquisa visa também verificar o desempenho de dois programas de computador para análise de redes de ventilação, sendo um programa mais antigo, disponível em linguagem FORTRAN e desprovido de recursos gráficos para entrada/saída, consistindo o outro em um programa comercial em versão recente para Windows 95/NT, de larga utilização por empresas de mineração do exterior.

1.3 METODOLOGIA

O trabalho envolveu duas fases distintas. Na primeira etapa foi verificado o sistema de ventilação por insuflamento anteriormente adotado na mina Medrado, que perdurou até Março de 1998, onde o ar fresco era conduzido por dutos a todos os pontos da mina com necessidade de ventilação. Os trabalhos de campo consistiram no levantamento de parâmetros, características do circuito de ventilação e equipamentos, tendo sido efetuadas medições da vazão do ar em diversos pontos da mina. O sistema foi numericamente resolvido usando o programa em FORTRAN desenvolvido pela Mines Accident Prevention of Ontario (MAPAO) do Canadá. Os resultados foram comparados com as medições.

Na segunda fase foi analisado o sistema por sucção implantado a partir de Março de 1998, no qual o ventilador principal foi instalado no topo da chaminé construída pelo método raise borer. O novo circuito foi então modelado numericamente através do programa comercial VentSim, de origem australiana. Novamente a consistência dos resultados da simulação numérica foi verificada através das medições de vazão em alguns pontos.

1.4 ABRANGÊNCIA

A pesquisa assumiu as hipóteses clássicas da ventilação de minas que consistem em escoamento turbulento e regime incompressível, havendo a validade destas restrições sido analisada para o caso prático abordado de mina pouco profunda. Também não foram considerados os princípios termodinâmicos envolvidos na determinação da ventilação natural.

No Capítulo 2 são revistos os princípios e equações fundamentais do escoamento de ar sob as condições de ventilação de minas, enquanto que o estudo detalhado do cálculo de redes de ventilação, incluindo os fundamentos para a solução por métodos analíticos e numéricos é considerado no Capítulo 3.

O Capítulo 4 enfoca os dois programas para a solução de redes de ventilação adotados na pesquisa. As características do programa em FORTRAN desenvolvido pela MAPAO são consideradas com minúcia, haja vista a dificuldade de obtenção de documentação daquele programa. As principais características do programa VentSim são então apresentadas.

No Capítulo 5 são analisados os sistemas de ventilação anterior e atual da Mina Medrado, sendo também estabelecidas as comparações entre as soluções numéricas com as medições de vazão efetuadas.

Finalmente o Capítulo 6 enumera as conclusões e recomendações da pesquisa.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A análise de redes de ventilação de minas subterrâneas requer o conhecimento de alguns princípios básicos que regem o seu funcionamento. Uma visão geral e sucinta destes princípios básicos é o objetivo deste capítulo.

2.1 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 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 recebem a denominação de ventilação mecânica ou ventilação artificial, sendo este tipo de fluxo, na grande maioria dos casos, o principal componente de um sistema de ventilação de mina.

2.2 COMPORTAMENTO DO FLUXO DE AR EM MINAS

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.

2.2.1 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 que:

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

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

w_i = densidade do ar no ponto i (Kg/m^3)

A_i = área do fluxo, normal à sua direção, no ponto i (m^2)

V_i = velocidade do fluxo no ponto i (m/s)

Se a densidade do ar é constante nos pontos considerados,

$$A_1V_1 = A_2V_2 = A_iV_i \quad (2.2)$$

ou

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

onde Q_i representa a vazão no ponto i (m^3/s)

2.2.2 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: $\frac{P}{wg} + \frac{V^2}{2g} + H$, 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 pascais (Pa) dada por:

$$P + \frac{wV^2}{2} + Hwg.$$

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, se considerarmos duas secções transversais de um conduto, limitantes do sistema de fluxo entre elas, e expressarmos

as formas de energia do fluxo, por unidade de volume ou em termos de pressão, teremos:

$$P_1 + w \frac{V_1^2}{2} + H_1 w g = P_2 + w \frac{V_2^2}{2} + H_2 w g \quad (2.4)$$

onde os índices 1 e 2 correspondem às secções consideradas.

2.2.3 Pressões Estática, Dinâmica e Total

De acordo com Chasteau (1974, p.221), as pressões P_1 e P_2 na equação (2.4) são referidas como pressões estáticas e agem em todas as direcções indiferentemente da direcção do fluxo. Os termos $\frac{wV_1^2}{2}$ e $\frac{wV_2^2}{2}$ também têm 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 $\left(P + \frac{wV^2}{2} \right)$, porém alguns textos consideram a pressão total como a soma dos três termos da equação de Bernoulli, isto é, $P + \frac{wV^2}{2} + Hwg$.

2.2.4 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 não produz erros.

Chasteau (1974, p.226) demonstra 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%.

Quando a mudança for maior que 5%, torna-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 devidas principalmente à resistência friccional, a equação (2.4) 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,

$$P_1 + w \frac{V_1^2}{2} + H_1 w g = P_2 + w \frac{V_2^2}{2} + H_2 w g + p \quad (2.5)$$

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 (2.5) é modificada pela adição, ao seu lado esquerdo, deste aumento de pressão total. Assim tem-se:

$$P_1 + w \frac{V_1^2}{2} + H_1 w g + p_v = P_2 + w \frac{V_2^2}{2} + H_2 w g + p \quad (2.6)$$

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

2.2.5 - Número de Reynolds

Quanto às trajetórias das partículas de um fluido em movimento, no que diz respeito ao ordenamento e regularidade destas trajetórias (linhas de fluxo), a vazão do fluido pode se apresentar nos estados laminar, turbulento ou intermediário. Para a determinação das fronteiras destes estados, adota-se o número de Reynolds (R_e), que é função das propriedades do fluido e obtém-se a partir da relação seguinte:

$$R_e = \frac{wDV}{\mu} = \frac{DV}{\nu} \quad (2.7)$$

onde

R_e = número de Reynolds (adimensional)

w = densidade do fluido (Kg/m^3)

μ = viscosidade absoluta (Pa.s ou Kg/m.s)

ν = viscosidade cinemática (m^2/s)

D = diâmetro do duto (m)

V = velocidade do fluxo (m/s)

Segundo Hartman (1982, p.145), 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/m³, 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.

2.3 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,

$$P = P_f + P_x \quad (2.8)$$

onde

p_f = perda de pressão por fricção (Pa)

p_x = perda de pressão por choque (Pa)

2.3.1 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:

$$P_f = \frac{KLCV^2}{A} \quad (2.9)$$

onde

K = fator de fricção (Ns^2/m^4 ou Kg/m^3)

L = comprimento da galeria (m)

C = Perímetro da galeria (m)

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

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

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 $V = \frac{Q}{A}$, tem-se:

$$P_f = \frac{KLCQ^2}{A^3} \quad (2.10)$$

onde Q = taxa de volume ou vazão do ar (m^3/s).

Para uma densidade do ar diferente da padrão de $1,2 \text{ Kg/m}^3$,

$$P_f = \left(\frac{KLCQ^2}{A^3} \right) \cdot \left(\frac{w}{1.2} \right) \quad (2.11)$$

2.3.2 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

$$K = \frac{pA^3}{CLQ^2} \quad (2.12)$$

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, p.151).

2.3.3 Determinação da Resistência

Para uma determinada galeria, o termo $\frac{KLC}{A^3}$ da equação de Atkinson é constante, sendo representado por R , resultando em

$$p_f = (RQ^2) \left(\frac{w}{12} \right) \quad (2.13)$$

ou, para densidade padrão do ar

$$p_f = RQ^2 \quad (2.14)$$

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

2.3.4 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

$$P_x = \frac{\theta_w V^2}{2} \quad (2.15)$$

onde :

θ = fator de perda por choque (adimensional)

w = densidade do ar (Kg/m^3)

V = velocidade do fluxo (m/s)

O fator de perda θ 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 de figuras ilustrativas e gráficos auxiliares (Hartman, 1982, pp. 715-718).

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

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,

$$P_f = P_x$$

ou

$$\frac{KLCV^2}{A} = \frac{\theta w V^2}{2}$$

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

$$L_e = \frac{\theta w A}{2KC} \quad (2.16)$$

2.3.5 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 (2.10) e (2.14) são alteradas respectivamente para

$$P = \frac{K(L + L_e)CQ^2}{A^3} \quad (2.17)$$

e

$$p = RQ^2 \quad (2.18)$$

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

Uma galeria ou sistema de galerias que formam um circuito de ventilação é representado pela equação (2.18), que corresponde graficamente a uma parábola que passa na origem de um sistema de coordenadas p - Q , conforme mostrado na Figura 2.1. Esta representação gráfica é conhecida como curva característica da galeria ou mina. A Figura 2.2 mostra que quanto maior for a resistência do sistema, mais fechada será a sua curva característica (Yanes, 1977, p.63).

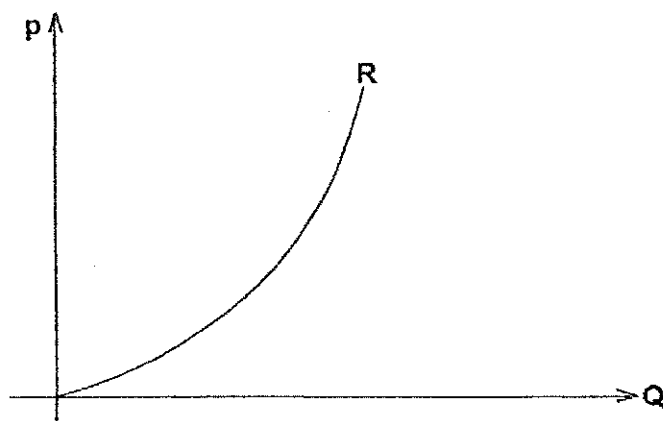


Figura 2.1 - Curva característica de mina ou galeria.
Fonte: Yanes (1977,p.63).

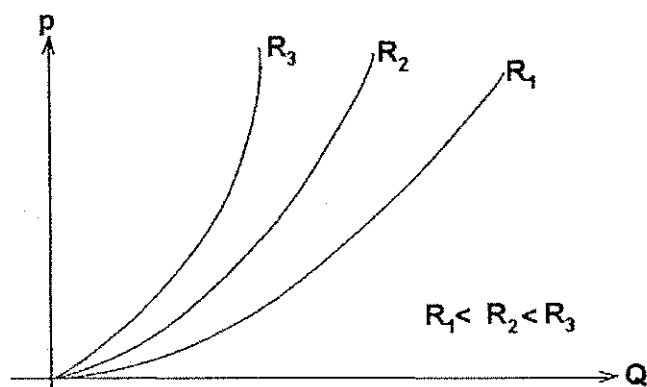


Figura 2.2 - Formas das curvas características de acordo com a resistência do sistema.
Fonte: Yanes (1977,p.63).

2.4 POTÊNCIA 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 $\frac{pAl}{t}$.

Como $\frac{At}{t} = Q$ (m³/s),

$$W = pQ \quad (2.19)$$

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

2.5 CIRCUITOS DE VENTILAÇÃO

A distribuição do ar e a queda de pressão de um sistema de ventilação de mina dependerão da forma como as galerias estejam conectadas entre si. Estas conexões podem ocorrer basicamente de duas maneiras: em série e em paralelo. Normalmente, contudo, os sistemas de ventilação de mina são formados por galerias conectadas de uma forma complexa, envolvendo os dois tipos de circuito combinados, recebendo a denominação de redes de ventilação.

2.5.1 - Circuitos em Série

Os circuitos em série são aqueles nos quais a corrente de ar não sofre ramificação, e apresentam as seguintes características:

a) A taxa do fluxo de volume, ou vazão, é a mesma ao longo de todo o circuito.

Ou seja,

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3 = \dots$$

b) A queda de pressão total para o circuito inteiro, é igual à soma das quedas de pressão em cada uma das galerias do circuito.

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \dots$$

c) A resistência do circuito inteiro é igual à soma das resistências individuais das galerias do circuito.

Como $p_1 = R_1 Q^2$, $p_2 = R_2 Q^2$, $p_3 = R_3 Q^2$, etc.

tem-se que $p = (R_1 + R_2 + R_3 + \dots) Q^2$

Se a resistência total do circuito é R_s , então

$$p = R_s Q^2$$

onde $R_s = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$

O circuito em série é mostrado esquematicamente na Figura 2.3

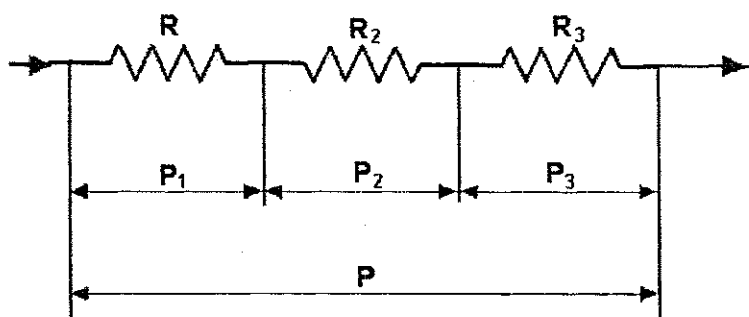


Figura 2.3 - Características do circuito em série
Fonte: McPherson (1974, p.347).

A curva característica resultante de um sistema de galerias conectadas em série se obtém pela soma das curvas características de todas as galerias componentes, segundo o sentido das pressões, conforme se pode ver na Figura 2.4.

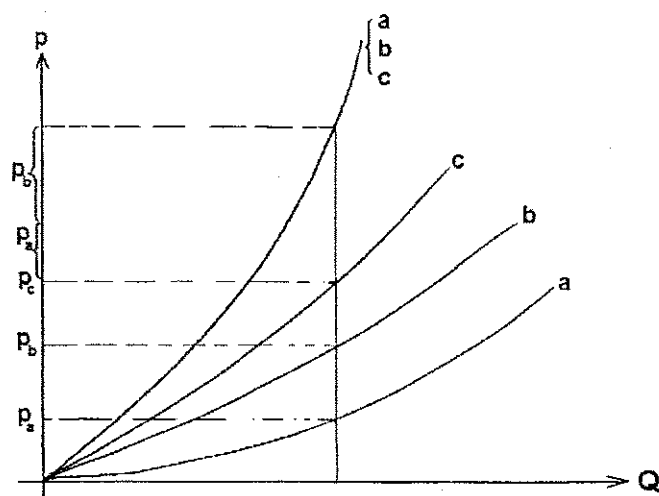


Figura 2.4 - Curvas características individuais e resultante de galerias em série.
Fonte: Yanes (1977,p.63).

2.5.2 - Circuitos em Paralelo

Os circuitos em paralelo são aqueles nos quais a corrente de ar sofre subdivisão e apresenta as seguintes propriedades:

a) A quantidade total da taxa de fluxo de volume de ar para o circuito é igual à soma das taxas de volume de ar de cada uma das galerias do circuito. Isto é,

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots$$

b) A queda de pressão é comum para cada galeria do circuito.

$$P = P_1 = P_2 = P_3 = \dots$$

c) O inverso da raiz quadrada da resistência do circuito inteiro, é igual à soma dos inversos das raízes quadradas das resistências individuais das galerias do circuito.

Das características **a** e **b** tem-se:

$$p = R_1 Q_1^2 = R_2 Q_2^2 = R_3 Q_3^2 = \dots$$

ou

$$Q_1 = \sqrt{\frac{P}{R_1}}, \quad Q_2 = \sqrt{\frac{P}{R_2}}, \quad Q_3 = \sqrt{\frac{P}{R_3}}, \quad \text{etc.}$$

e

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots = \sqrt{P} \left(\frac{1}{\sqrt{R_1}} + \frac{1}{\sqrt{R_2}} + \frac{1}{\sqrt{R_3}} + \dots \right)$$

Se a resistência total do circuito é R_p , então

$$Q = \sqrt{\frac{P}{R_p}}$$

e

$$\frac{1}{\sqrt{R_p}} = \frac{1}{\sqrt{R_1}} + \frac{1}{\sqrt{R_2}} + \frac{1}{\sqrt{R_3}} + \dots$$

A Figura 2.5 mostra um desenho esquemático de um circuito em paralelo.

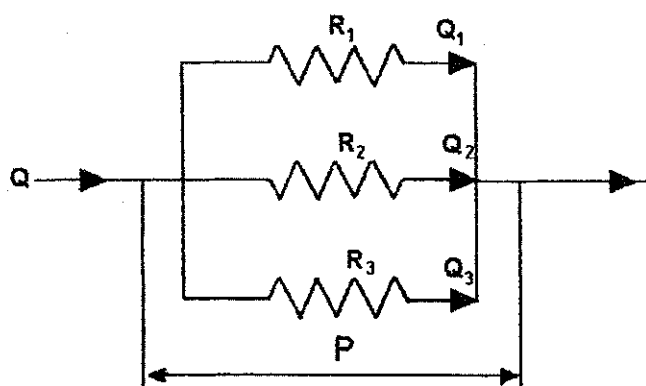


Figura 2.5 - Características do circuito em paralelo.
Fonte: McPherson (1974, p.348).

A curva característica resultante de um sistema de galerias conectadas em paralelo se obtém pela soma das curvas características de todas as galerias componentes, segundo o sentido das vazões, conforme mostrado na Figura 2.6 .

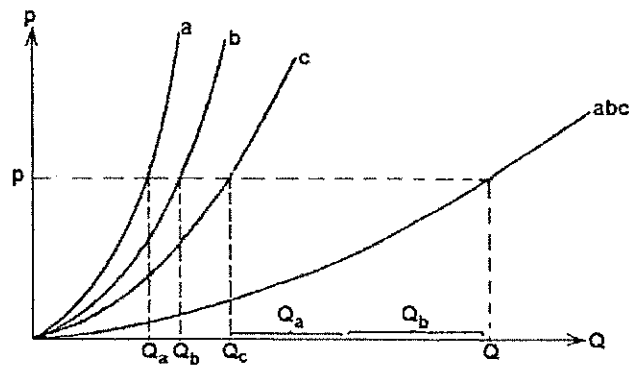


Figura 2.6 - Curvas características individuais e resultante de galerias conectadas em paralelo.

Fonte: Yanes (1977, p.64).

2.6 OPERAÇÃO DE 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, p.375).

2.6.1 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 consideradas: pressão estática e pressão total.

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

Tem-se então,

$$F_T = F_S + F_V \quad (2.20)$$

Onde

F_T = pressão total do ventilador

F_S = pressão estática do ventilador

F_V = pressão de velocidade do ventilador.

Sabe-se ainda que

$$V = \frac{Q}{A} \quad (2.21)$$

e

$$F_V = \frac{wV^2}{2} \quad (2.22)$$

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 de velocidade com auxílio das equações (2.21) e (2.22) e a pressão total através da equação (2.20).

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

2.6.2 Potência e Eficiência do Ventilador

A equação (2.19) 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 η_T ou eficiência estática η_S , conforme as equações (2.23) e (2.24) respectivamente.

2.6.3 Tipos de Ventiladores

Há 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.

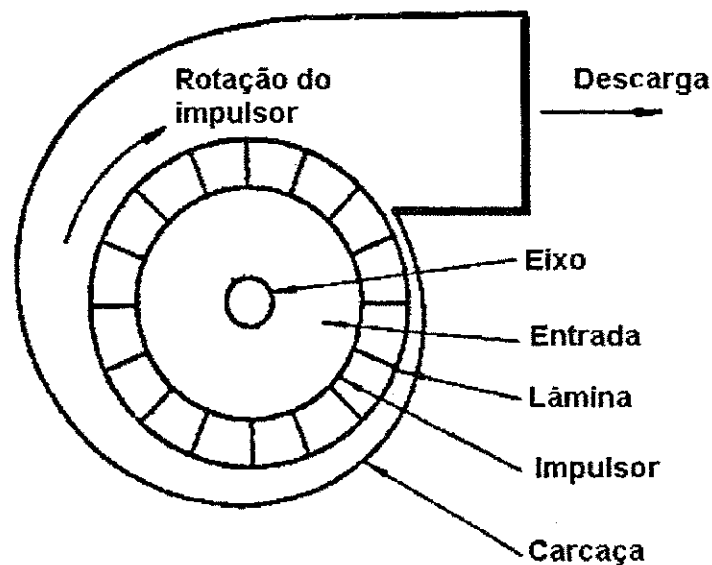


Figura 2.8 - Elementos básicos de um ventilador centrífugo.
Fonte: Vutukuri (1986,p.42).

Com relação à disposição das pás da hélice, os ventiladores centrífugos podem ser classificados em três tipos:

1) Os de laminação para trás, quando as pás estão inclinadas na direção contrária à da rotação.

2) Os de laminação radial, quando as pás apresentam direção radial.

3) Os de laminação para frente, quando as pás são inclinadas na mesma direção da rotação.

A Figura 2.9 apresenta as três formas de disposição das lâminas do impulsor com seus respectivos ângulos de laminação.

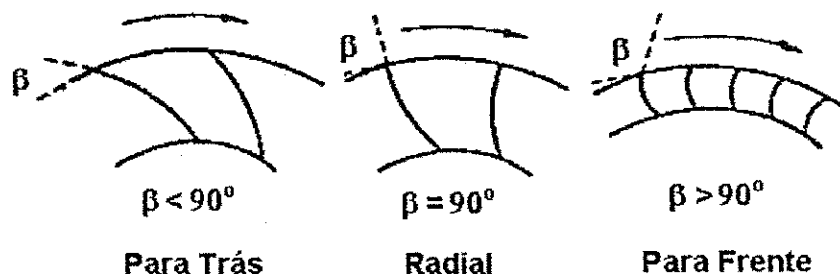


Figura 2.9 - Tipos de laminação do impulsor nos ventiladores centrífugos.
Fonte: Vutukuri (1986,p.43).

Nos ventiladores de fluxo axial, o impulsor, que consta de pás montadas em disco ou em uma superfície aerodinâmica, gira em uma secção 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 obter 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.

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.

Um outro tipo de ventilador de fluxo axial, é dotado de dois impulsores em série, que giram entretanto em direções opostas, com a finalidade de alinhar a saída do fluxo de ar, ao invés do uso de paletas guias.

A carcaça de um ventilador de fluxo axial consta, além da secção 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 2.10 esquematiza os principais elementos de um ventilador de fluxo axial.

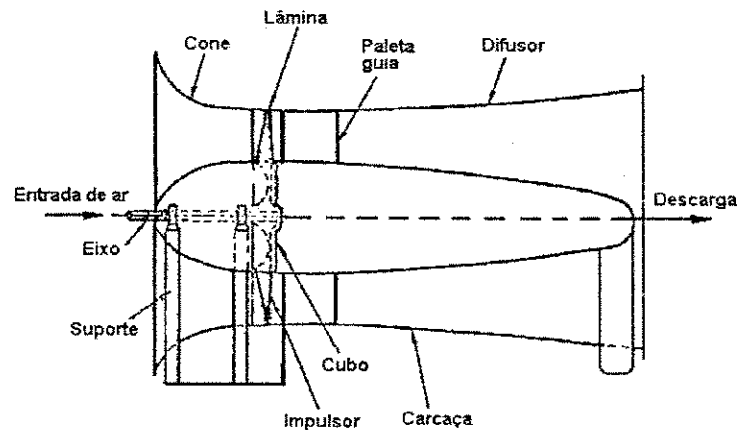


Figura 2.10 - Elementos básicos de um ventilador de fluxo axial.
Fonte: Vutukuri (1986,p.45).

2.6.4 Leis do Ventilador

A vazão, pressão e potência de um ventilador, normalmente determinada 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:

Vazão:

$$Q \propto nD^3 \quad (2.25)$$

Pressão:

$$F \propto n^2 D^2 w \quad (2.26)$$

Potência:

$$W \propto n^3 D^5 w \quad (2.27)$$

sendo

n = velocidade de rotação do impulsor

D = 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.

2.6.5 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 η_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.

V.S.Vutukuri (1986 , p.42) estabelece, utilizando as relações (2.25) e (2.26), a seguinte expressão para a velocidade específica de um ventilador de qualquer diâmetro:

$$\eta_s = \frac{nQ^{1/2}}{F^{3/4}} \quad (2.28)$$

A Figura 2.11 fornece curvas de velocidade específica versus eficiência para vários tipos de ventiladores.

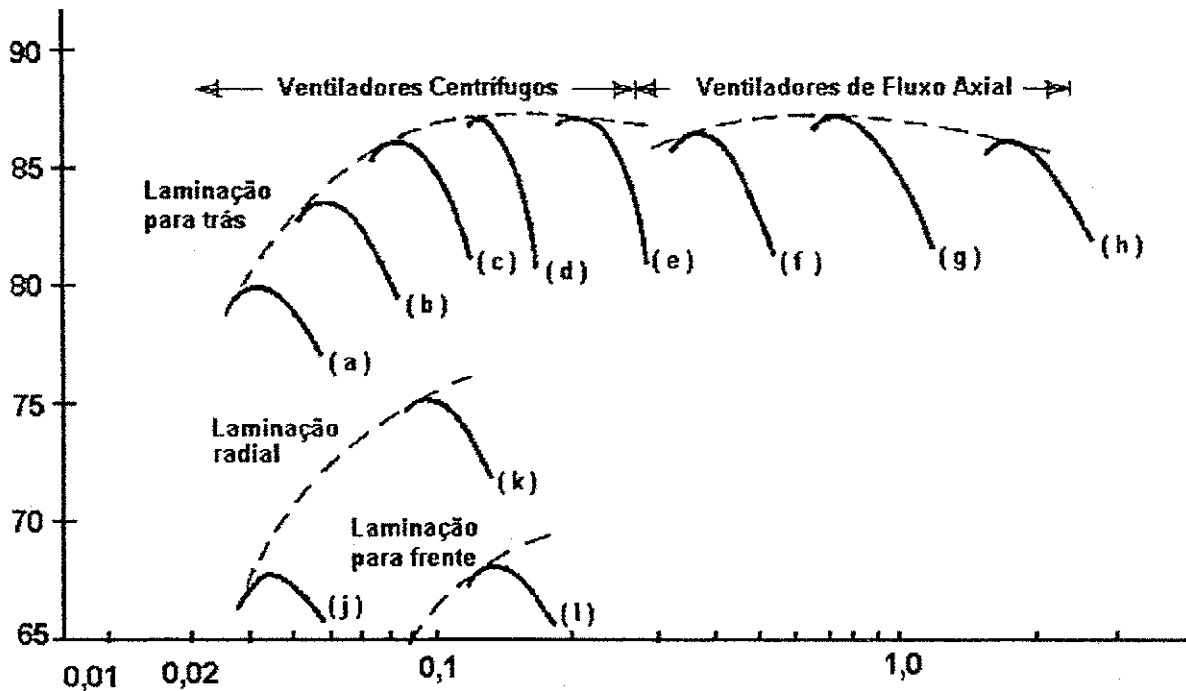


Figura 2.11 - Curvas de velocidade específica versus eficiência de vários tipos de ventiladores .
Fonte: Vutukuri (1986,p.47).

As melhores informações sobre o desempenho dos diversos tipos de ventiladores são obtidas através da análise de suas curvas características. A escolha de um determinado tipo de ventilador para uma determinada tarefa de ventilação de mina vai depender das condições e requisitos de cada caso. Além das pressões e vazões requeridas, devem ser levadas em consideração outras características do ventilador, tais como: eficiência, potência, velocidade de rotação, além de fatores adicionais como dimensões, custo, nível de ruído, etc.

2.6.6 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, as potência e eficiência do ventilador, que correspondem à vazão de operação do mesmo, podem também ser lidas, conforme mostra a Figura 2.12.

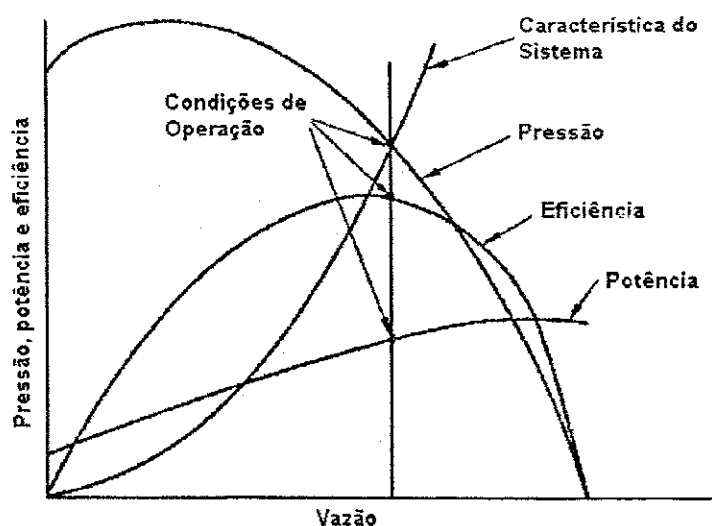


Figura 2.12 - Determinação do ponto de operação do ventilador.
Fonte: Vutukuri (1986, p.49).

2.6.7 - Combinação de Ventiladores

Dois ou mais ventiladores operando simultaneamente em um sistema de ventilação, podem estar combinados em série ou em paralelo, dependendo da localização e arranjo dos mesmos.

Na conexão em série, a vazão de cada ventilador é a mesma, mas a pressão total de todos é igual à soma das suas pressões totais individuais. A curva característica resultante deste tipo de conexão, é obtida pela adição das pressões totais de cada ventilador, correspondentes à vazão comum aos mesmos. A Figura 2.13 mostra as curvas características individuais e combinada de dois ventiladores conectados em série, juntamente com a curva característica do sistema em que operam.

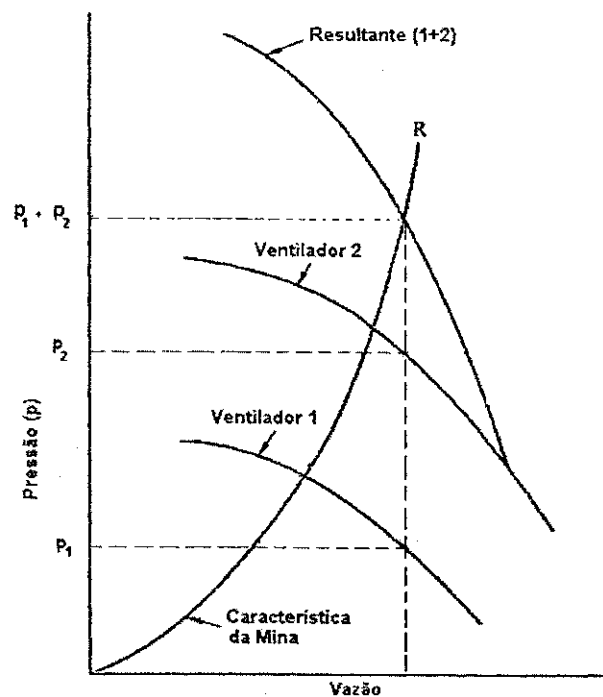


Figura 2.13 - Curva característica de dois ventiladores conectados em série.

Fonte: Vutukuri (1986, p.50).

Na conexão em paralelo, para uma dada pressão total, que é a mesma para cada ventilador, a vazão total é igual à soma das suas vazões individuais. A curva característica de uma conexão em paralelo, é obtida pela adição das vazões de cada ventilador que correspondem à pressão total comum aos mesmos, conforme mostra a Figura 2.14.

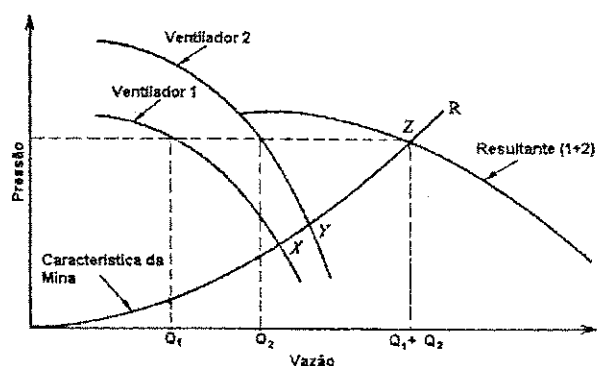


Figura 2.14 - Curva característica de dois ventiladores conectados em paralelo.

Fonte: Vutukuri (1986,p.52).

2.6.8 Combinação de Ventiladores com Ventilação Natural

De uma forma geral, um sistema de ventilação de mina é constituído de pressões de ventilação natural e mecânica atuando simultaneamente.

A ventilação natural pode aumentar ou diminuir a resistência contra a qual o ventilador opera, resultando em um sistema com pressão natural contra ou com o ventilador, respectivamente.

Curvas características de um sistema combinado podem ser traçadas de duas maneiras, conforme mostra a Figura 2.15. No primeiro método de representação a curva do ventilador é alterada para uma posição acima ou abaixo da posição normal, dependendo da ventilação natural atuar com ou contra o ventilador. De acordo com essas mesmas condições, no outro método de representação ocorre o inverso, onde a curva da mina pode ser deslocada para baixo ou para cima da sua posição normal. Em

ambos os casos, o valor do deslocamento é equivalente à pressão de ventilação natural. O resultado das duas representações é o mesmo, ou seja, a quantidade do fluxo de ar aumenta ou diminui dependendo da existência de ventilação natural atuando com ou contra o ventilador.

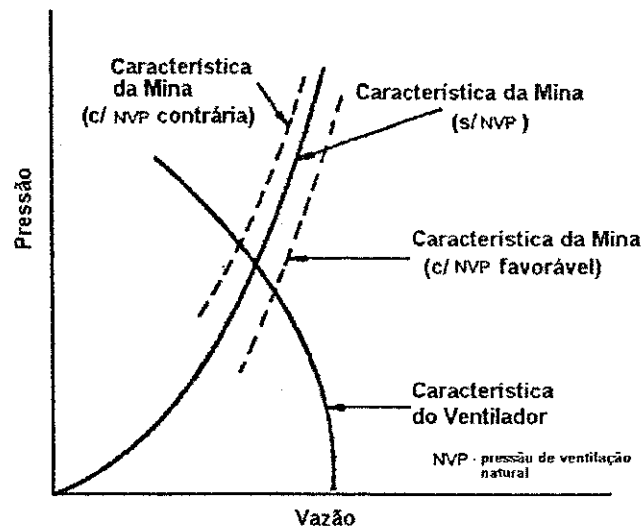


Figura 2.15 - Curvas características de um sistema combinado de ventilação natural e mecânica.

Fonte: Vutukuri (1986, p.56).

CAPÍTULO 3

ANÁLISE NUMÉRICA DE REDES DE VENTILAÇÃO

A análise da rede de ventilação de uma mina consiste principalmente na determinação da distribuição do fluxo de ar através da mesma, a partir de diversos dados necessários para a sua caracterização. Entre estes dados característicos destacam-se o arranjo (*layout*) da rede de ventilação, as resistências dos ramos, além da locação e curvas características dos ventiladores que fazem parte do sistema em estudo.

Simulações permitem ainda a previsão do comportamento de futuras distribuições do fluxo de ar, decorrentes de alterações do sistema provocadas pelo desenvolvimento da mina ou tentativas de otimização do referido sistema.

Técnicas de análise direta são usadas para o caso de redes muito simples, podendo porém ser utilizadas em seções localizadas de uma mina, em virtude da complexidade que um arranjo do sistema completo geralmente apresenta.

Análises de redes através de modelos analógicos (McPherson, 1974, p.352) foram muito utilizadas nas décadas de 50 e 60. Neste método de análise, modelos hidráulicos ou elétricos são usados para representar uma rede de ventilação, com base na similaridade existente entre as equações que regem estes diferentes processos.

Nos dias de hoje, contudo, a menos que exista algum objetivo didático, a análise de redes de ventilação é feita, quase sempre, através de programas aplicativos computacionais que utilizam métodos iterativos de análise numérica. Este capítulo tem

3.2 AS LEIS DE KIRCHHOFF PARA REDES DE VENTILAÇÃO

As leis de Kirchhoff da corrente e da voltagem aplicadas para redes elétricas, são válidas também para redes de ventilação, onde a vazão de ar e a perda de pressão substituem respectivamente a corrente elétrica e a voltagem.

A aplicação da 1ª lei de Kirchhoff para redes de ventilação pode se resumir na afirmativa de que a soma das quantidades de ar (vazões) que fluem em direção a uma junção é igual à soma das quantidades de ar que fluem da junção (McPherson, 1974, pp. 343 e 344). Assim,

$$\sum_{i=1}^n Q_i = 0 \quad (3.1)$$

onde Q_i é a taxa de volume do ar (vazão) no ramo i conectado a uma determinada junção, havendo n ramos.

Da mesma forma, a aplicação da 2ª lei de Kirchhoff para redes de ventilação de mina (McPherson, 1974, pp. 344-345), pode conduzir ao enunciado prático de que a soma algébrica de todas as quedas de pressão por fricção em torno de qualquer malha fechada, menos qualquer pressão de ventilador e/ou pressão de ventilação natural existentes naquela malha, é igual a zero. Ou seja, para uma malha com m ramos,

$$\sum_{i=1}^m (p_i - F_i) - (NVP) = 0 \quad (3.2)$$

onde

p_i = queda de pressão por fricção no ramo i (Pa)

F_i = pressão total do ventilador no ramo i (Pa)

(NVP) = pressão de ventilação natural na malha (Pa)

Para o caso de malhas onde inexistem ventiladores e pressão de ventilação natural, a equação (3.2) torna-se:

$$\sum_{i=1}^m p_i = 0 \quad (3.3)$$

A validade das equações (3.2) e (3.3) fica restrita para densidade do ar padrão w . Portanto, diferenças de pressão p_0 medidas com densidade do ar w_0 , devem ser padronizadas pela relação

$$p = \left(\frac{w}{w_0} \right) p_0 \quad (3.4)$$

3.3 MÉTODOS PARA SOLUÇÃO DE REDES DE VENTILAÇÃO

Além da utilização de modelos físicos para representação e análise de um sistema de ventilação, três métodos podem ser utilizados para a solução de uma rede ou parte dela. Da complexidade da rede a ser analisada dependerá a escolha do método a ser aplicado.

3.3.1 Método das Resistências Equivalentes

Esta técnica de análise é aplicável somente para redes simples, isto é, redes que são compostas por galerias conectadas em série e/ou em paralelo. Como a maioria das minas não podem ser descritas na sua totalidade por uma configuração que apresente conexões em série e/ou em paralelo, este método fica restrito, na maioria dos casos, a setores localizados das mesmas.

A solução consiste na determinação das resistências equivalentes para os ramos conectados em série e/ou em paralelo, as quais, de acordo com o que foi visto nas seções 2.5.1 e 2.5.2, podem ser expressas pelas equações:

$$R_s = \sum_{i=1}^b R_i \quad (3.5)$$

$$\frac{1}{\sqrt{R_p}} = \sum_{i=1}^b \frac{1}{\sqrt{R_i}} \quad (3.6)$$

onde R_s e R_p representam as resistências equivalentes para b ramos conectados em série e em paralelo respectivamente.

Um exemplo da aplicação deste método para um pequeno trecho de uma mina, encontra-se no Anexo 1.

3.3.2 - Método da Análise Direta

Esta técnica de análise de rede consiste na aplicação das 1ª e 2ª leis de Kirchhoff respectivamente para cada uma das junções da rede analisada e para um determinado número de malhas contidas na mesma (McPherson, 1974, p.350).

O número de equações a serem resolvidas deve ser igual ao número de fluxos a determinar e portanto ao número de ramos da rede considerada. Se portanto a rede contiver r ramos, r equações devem ser resolvidas. Para j junções existentes na rede, a aplicação da 1ª lei de Kirchhoff, expressa pela equação (3.1), fornecerá um total de j equações, porém, como os fluxos em uma das junções são determinados pelos fluxos das outras junções, tem-se apenas $j-1$ equações independentes. As " $r-(j-1)$ " equações restantes serão obtidas pela aplicação da 2ª lei de Kirchhoff, expressa pela equação (3.2), a esse mesmo número de malhas.

A técnica da análise direta consiste portanto em se resolver $j-1$ equações de junção (1ª lei de Kirchhoff) e $r-(j-1)$ equações de malha (2ª lei de Kirchhoff).

O Anexo 1 também contém um exemplo prático da aplicação deste método que facilitará a compreensão do mesmo.

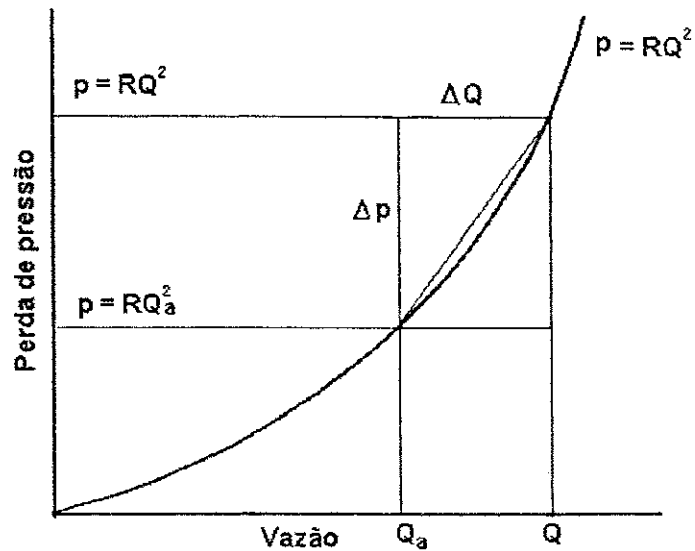
3.3.3 Método da Solução Numérica de Hardy-Cross

Este método de análise de rede de fluido, consiste em um processo de cálculo iterativo, a partir de uma distribuição de fluxo inicial estimada, com sucessivas correções aplicadas aos fluxos de cada ramo da rede, até que um grau aceitável de exatidão seja obtido.

Desta forma, para o caso de redes de ventilação de mina, a determinação da verdadeira taxa de fluxo de volume de ar Q através de uma galeria, é feita a partir de um valor inicial estimado Q_a . Se ΔQ é o erro contido na quantidade assumida em relação à taxa de volume real Q , tem-se (Vutukuri, 1986, pp.35-38).

$$Q = Q_a + \Delta Q \quad (3.7)$$

Conforme pode ser visto na Figura 3.2, existe um erro na queda de pressão Δp correspondente ao erro na taxa de fluxo de volume ΔQ . Observa-se ainda da Figura, que a inclinação da curva na região de Q e Q_a é dada aproximadamente por $\frac{\Delta p}{\Delta Q}$ que no limite, quando ΔQ tende para zero, torna-se $\frac{dp}{dQ}$.



R = resistência; Q_a = taxa de fluxo de volume estimada

Figura 3.2 - Representação gráfica do método de análise de Hardy-Cross.

Fonte: Vutukuri (1986, p.36).

Diferenciando a equação $p = RQ^2$, tem-se

$$\frac{dp}{dQ} = 2RQ$$

ou, para a vazão estimada,

$$\frac{dp}{dQ} = 2RQ_a$$

Então, aproximadamente,

$$\frac{\Delta p}{\Delta Q} = 2RQ_a \quad \text{ou} \quad \Delta Q = \frac{\Delta p}{2RQ_a}$$

Mas como,

$$\Delta p = RQ^2 - RQ_a^2,$$

então,

$$\Delta Q = \frac{(RQ^2 - RQ_a^2)}{2RQ_a} \quad (3.8)$$

A equação (3.8) fornece a correção para ser aplicada à quantidade estimada da taxa de fluxo de volume de apenas um ramo. Para b ramos formando uma malha fechada dentro de uma rede de ventilação, o valor composto da correção da taxa de fluxo de volume ΔQ_m , conhecido como fator de correção de malha é dado por:

$$\Delta Q_m = \frac{\sum_{i=1}^b (R_i Q_i^2 - R_i Q_{i,a}^2)}{\sum_{i=1}^b 2R_i Q_{i,a}} \quad (3.9)$$

Sabe-se, de acordo com a equação (2.14), que a queda de pressão por fricção ao longo do ramo i é $R_i Q_i^2$, para a vazão real Q_i . Então, da 2ª lei de Kirchhoff, expressa na equação (3.3), tem-se,

$$\sum_{i=1}^b R_i Q_i^2 = 0$$

e a equação (3.9) torna-se

$$\Delta Q_m = \frac{-\sum_{i=1}^b R_i Q_{i,a}^2}{\sum_{i=1}^b 2R_i Q_{i,a}} \quad (3.10)$$

No cálculo dos fatores de correção de malha, deve-se levar em consideração o sinal das quedas de pressão (na direção do fluxo, a queda de pressão é sempre positiva). Por isso, a equação (3.10) pode ser reescrita na forma.

$$\Delta Q_m = \frac{-\sum_{i=1}^b R_i Q_{i,a} |Q_{i,a}|}{\sum_{i=1}^b 2R_i |Q_{i,a}|} \quad (3.11)$$

onde $|Q_{i,a}|$ é o valor absoluto de $Q_{i,a}$

Cada malha terá um sinal de convenção escolhido, a fim de referenciar os fluxos dos ramos em torno daquela malha. Para aplicação manual do método, costuma-se escolher o sentido horário em torno de cada malha como a direção positiva (McPherson, 1974, p.356).

Para uma malha contendo ventilador e/ou pressão de ventilação natural, usa-se a forma completa da 2ª lei de Kirchhoff (equação 3.2), e a inclinação da curva característica do ventilador, tornando a equação (3.11) na seguinte forma:

$$\Delta Q_m = \frac{-\left[\sum_{i=1}^b (R_i Q_{i,a} |Q_{i,a}| - F_i) - (NVP)_m \right]}{\sum_{i=1}^b (2R_i |Q_{i,a}| - S_i)} \quad (3.12)$$

onde F_i e S_i são respectivamente a pressão e a inclinação da curva característica do ventilador no ramo i à taxa de fluxo de volume $Q_{i,a}$. Deve-se ainda considerar as pressões de ventilação natural independentes da taxa de fluxo de volume.

Os fatores de correção de malha fornecidos pela equação (3.12), quando aplicados aos valores iniciais dos fluxos, não resultam de imediato numa perfeita distribuição do fluxo ao longo da rede. Por este motivo, a técnica deve ser repetida até que os valores de todos os fatores de correção de malha aproximem-se suficientemente de zero para se alcançar a precisão requerida.

Um dos fatores mais importantes para uma maior rapidez na obtenção do modelo de fluxo ideal é a escolha das malhas dentro da rede, pois malhas mal escolhidas requererão um maior número de iterações para se chegar ao equilíbrio do modelo de fluxo. Ramos de alta resistência diminuem a velocidade de convergência. Por este motivo cada ramo de alta resistência deve aparecer em apenas uma malha.

A seqüência de ações ou procedimentos a serem seguidos na aplicação manual do método de Hardy-Cross (McPherson, 1974, p.357) são:

- 1º) A estimativa da quantidade do fluxo de ar através de cada ramo da rede e também da pressão desenvolvida pelos ventiladores. Os fluxos de ar estimados devem obedecer à 1ª lei de Kirchhoff em cada junção.
- 2º) O exame da rede e a decisão sobre um modelo de malhas fechadas, onde o menor número delas é dado por: "Nº de ramos - Nº de junções + 1", devendo-se observar que o projeto das malhas deve conter todas as partes da rede e que não deve haver mais que um ramo de alta resistência em uma só malha e que tal ramo não deverá aparecer em mais que uma malha.
- 3º) A avaliação do fator de correção de malha ΔQ_m para cada malha, de acordo com a equação (3.12).
- 4º) A correção do fluxo em cada ramo.
- 5º) A repetição dos 3º e 4º itens até que todos os valores de ΔQ_m estejam abaixo do nível preestabelecido.
- 6º) A repetição dos 2º ao 5º itens para cada mudança proposta para a rede.

Um exemplo de aplicação manual, para uma rede simples de ventilação, do método de análise de Hardy-Cross também consta do Anexo 1.

3.4 UTILIZAÇÃO DE COMPUTADORES NA ANÁLISE DE REDES

De maneira geral, para sistemas práticos de mina, os métodos de análise de redes de ventilação são impraticáveis se efetuados manualmente. Programas de computador têm sido desenvolvidos para a aplicação de técnicas iterativas de análise, os quais requerem mais ou menos espaço de memória de acordo com a complexidade do programa, a linguagem na qual está escrito e o tamanho da rede a ser analisada.

A Figura 3.3 mostra um fluxograma simplificado das principais rotinas de um programa típico de análise de rede de ventilação que utiliza a técnica iterativa de Hardy-Cross; e uma descrição resumida das operações contidas nestas rotinas é feita nas seções seguintes (McPherson, 1974, pp.362 a 367).

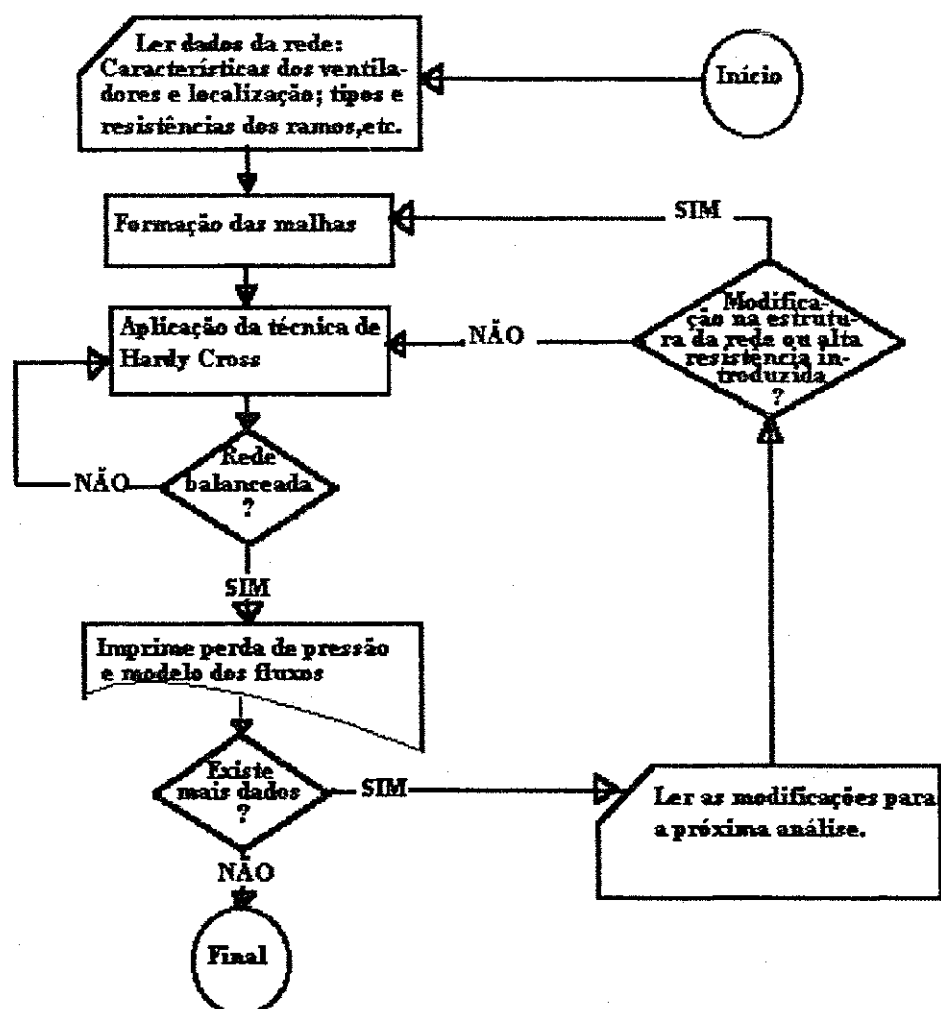


Figura 3.3 - Fluxograma de um programa de análise de rede de ventilação pelo método de Hardy-Cross. Fonte: McPherson (1974, p.363).

3.4.1 Dados de Entrada

Os dados de entrada necessários para a análise de uma rede de ventilação, os quais variam quanto à forma como são fornecidos, de acordo com os diversos programas existentes, englobam uma série de informações específicas sobre a rede básica de ventilação, os ventiladores, as pressões de ventilação natural e as modificações a serem processadas para cada ensaio. Um maior detalhamento desses dados de entrada é feito a seguir.

3.4.1.1 Sobre a Rede Básica de Ventilação

A rede básica, normalmente definida pelo último levantamento de ventilação, é especificada por cada um dos ramos que a compõem seguido dos correspondentes valores de resistência e quantidade de ar assumida. Os ramos são citados pelas suas junções inicial e final, representadas por números inteiros.

As resistências dos ramos e os outros dados da rede básica, para uma mina recém-projetada, são obtidos dos dados do projeto.

Alguns programas calculam as resistências dos ramos a partir de dados do levantamento de ventilação. Neste caso, todos os dados necessários para o referido cálculo devem ser fornecidos.

3.4.1.2 Sobre os Ventiladores

Para cada ventilador, devem ser fornecidas a posição e curva característica, definida por coordenadas de pressão e vazão, ou a pressão fixa, se for o caso.

3.4.1.3 Sobre as Pressões de Ventilação Natural (NVP)

Os valores de NVP, existentes em malhas especificadas, devem ser fornecidos. Alguns programas porém, requerem os valores de NVP referidos aos ramos. Outros programas calculam os valores de NVP em cada malha a partir de dados fornecidos de temperaturas, seca e úmida, e elevações de junções, relativas a algum ponto de referência.

3.4.1.4 Sobre as Modificações para Cada Ensaio

Cada ensaio realizado em uma rede de ventilação produzirá um modelo de fluxo. Uma ou mais modificações efetuadas na última rede analisada caracterizam um novo ensaio. As modificações a serem feitas de um para outro ensaio podem incluir: alterações nos valores das resistências, introdução de novos ramos, fechamento de ramos antigos, alterações na função ou posição de ventiladores e variações de NVP provenientes de variações climáticas.

3.4.2 Seleção de Malhas

A seleção de malhas pelos programas destinados à análise de redes pode ser feita através de dois métodos que, apesar de diferirem quanto à técnica de execução, satisfazem os critérios que devem ser seguidos para a obtenção do modelo ideal de distribuição do fluxo de ar na rede analisada (Seção 3.3.3).

No primeiro método de seleção, conhecido como técnica "*branch tree*", uma árvore de ramos básicos que apresentem alta resistência, fluxo de ar fixo ou ventiladores, serve de armação para a formação do número mínimo requerido de malhas.

No outro método de seleção, denominado como técnica "route-finding", o computador forma as malhas por tentativas. Na formação de cada malha, o programa percorre os ramos, de junção para junção, tentando encontrar uma rota que volte ao ponto inicial. Após o ramo inicial de cada malha, os ramos de fluxo fixo e alta resistência são ignorados. Rotas sem êxito são memorizadas para evitar que o computador tente novamente estas rotas na malha em formação.

3.4.3 O Procedimento Iterativo

Como a maioria dos programas destinados à análise de redes de ventilação utiliza o método de Hardy-Cross, os cálculos iterativos utilizados pelos mesmos, para obtenção dos fatores de correção de malhas, são baseados na equação (3.12).

Existe apenas uma diferença na execução por computador em relação à execução manual do método de Hardy-Cross. Enquanto nos cálculos manuais é conveniente determinar todos os fatores de correção de malha para aplicá-los aos fluxos dos ramos antes de uma nova iteração, nos cálculos por computador, cada fator de correção em uma dada malha, é imediatamente aplicado aos fluxos dos ramos daquela malha, antes do cálculo do próximo fator de correção.

3.4.4 Ramos com Ventiladores

O cálculo do fator de correção de uma malha que contém um ramo i onde existe um ventilador com pressão fixa F_i , é feito com a incorporação deste valor da pressão na equação 3.12, onde o valor da inclinação da curva S_i é assumido como zero.

Para o caso mais usual da curva característica do ventilador ser fornecida como dado de entrada, através de coordenadas de pressão e vazão, o programa determina a pressão do ventilador e a inclinação da curva característica correspondentes ao valor corrente do fluxo de ar durante a análise. Esta determinação

pode ser feita através do procedimento "curve-fitting" para definir uma equação que represente a curva característica relevante, ou através de interpolação linear entre pontos de coordenadas especificadas.

3.4.5 Ramos com Fluxo Determinado

De forma geral uma rede de ventilação deve conter alguns ramos com valores de fluxos de ar pré-fixados. É o caso, por exemplo, de galerias de transporte, as quais terão seus fluxos restritos a limites definidos, devidos a problemas de poeira. Da mesma forma, locais de operação terão seus fluxos determinados a partir da consideração de diversos fatores, tais como: umidade, temperatura, poeira, concentrações de gases, etc.

O valor pré-determinado da vazão de ar através de um local é obtido, na prática, pela instalação de portas de ventilação e pelo uso de reguladores ou ventiladores reforçadores. O uso de valores pré-fixados de fluxo, em ensaios de redes de ventilação, já é permitido pelos programas de análise usados atualmente. O método de análise de Hardy-Cross balanceia os fluxos de todos os outros ramos, de tal forma que os valores fixados de fluxo de ar sejam mantidos. Contudo, para que os valores dos fluxos de alguns ramos permaneçam inalterados, as resistências destes ramos deverão variar. A saída dos resultados da análise fornecerá então os valores de resistência nos ramos especificados, necessários para a manutenção dos respectivos fluxos requeridos. Estes valores de resistência serão usados para a obtenção do grau de regulação desejado.

Valores de resistência impossíveis de se realizarem na prática poderão resultar da fixação de valores não razoáveis de fluxo de ar. Um fluxo de ar muito alto, por exemplo, pode resultar numa resistência negativa. Isto significa que a obtenção do fluxo requerido só será possível com a utilização de um ventilador reforçador.

3.4.6 Saída dos Resultados

O formato e o conteúdo da saída dos resultados da análise de uma rede de ventilação dependerão do programa usado para tal. De forma geral, os resultados de uma rede inicial ou de cada ensaio subsequente, consistem na queda de pressão friccional, no fluxo de ar e na resistência em cada ramo da rede. Informações sobre a rede analisada, tais como quantidade de nós e número de ramos, além do número de iterações necessárias para a convergência da solução da rede, poderão também ser fornecidas.

Os resultados sairão normalmente na forma de tabelas, nos programas mais antigos ou de natureza didática. Já os programas comerciais atualmente disponíveis produzem saídas gráficas do traçado das redes, requerendo para tal a especificação das coordenadas das junções nos dados de entrada.

3.4.7 Modificações na Rede

Cada rede analisada poderá passar por um novo ensaio a partir de modificações efetuadas na mesma, as quais serão especificadas através de dados de entrada, que serão lidos pelo computador após o término da análise corrente. As principais modificações que podem ocorrer de um para outro ensaio são listadas na Secção 3.4.1, que trata dos dados de entrada. Cada modelo de fluxo resultante de uma análise serve de base para uma análise subsequente. Os ensaios de modificações na rede são, portanto, cumulativos.

Certas alterações tais como, resistências dos ramos, pressões ou localizações de ventiladores, são simplesmente endereçadas para o local da memória ocupado pela última rede analisada, onde os valores antigos são substituídos pelos novos. Já ensaios envolvendo ramos de alta resistência ou alterações na geometria da rede, requerem modificações no modelo de malhas. O computador então pesquisa o modelo de malhas armazenado na memória, adiciona novas malhas onde necessário e promove uma re-seleção daquelas existentes afetadas pelas mudanças.

3.5 ESCOLHA E USO DE PROGRAMAS DE VENTILAÇÃO DE MINAS

Em virtude da grande variedade de programas de análise de redes, disponíveis em organizações centrais de mineração ou institutos de pesquisa ou empresas de software de diversos países, alguns aspectos para a escolha dos mesmos deverão ser considerados pelo usuário.

Uma vez escolhido um programa de acordo com o equipamento disponível e com o nível de sofisticação desejado, o engenheiro de ventilação deve familiarizar-se com a extensão do programa e a forma precisa requerida para os dados de entrada. Um pequeno número de testes em redes simples, porém práticos, deve ser executado antes de uma escala de investigações.

A rede básica inicial, especificada pelos dados de entrada, representará normalmente a mina ao tempo do último levantamento de ventilação. O modelo de fluxo computado para esta rede deverá portanto concordar com as quantidades de ar medidas. A ocorrência de desvios apreciáveis entre os dois, indicará um erro no levantamento da ventilação ou enganos numéricos nos dados de entrada.

O próximo capítulo detalha o conteúdo e os procedimentos para instalação e execução de um programa básico de análise de rede de ventilação de mina de propriedade da Mines Accident Prevention Association of Ontario (MAPAO) – Canadá, e do programa comercial VentSim (VentSim, 1998) de origem Australiana.

CAPÍTULO 4

DESCRIÇÃO DOS PROGRAMAS UTILIZADOS

Neste capítulo são descritos os dois programas de computador usados na análise numérica de redes de ventilação desta pesquisa. Inicialmente é tratado o programa desenvolvido pela Mines Accident Prevention Association of Ontario - MAPAO do Canadá (MAPAO, 1989), disponível em linguagem FORTRAN 77. Em seguida descreve-se o programa comercial VentSim© (Stuart, 1998) em sua versão atualizada.

4.1 PROGRAMA DA MAPAO

O programa desenvolvido pela MAPAO é composto do programa principal (VPROG) e nove subrotinas, além de mais dois programas independentes destinados à criação dos arquivos de dados.

Desenvolvido para ser executado em computadores de grande porte (*mainframes*) da década de 80, o programa foi adaptado para possibilitar sua execução em PC, ou compatível, com um mínimo de 512 Kbytes de memória RAM, dotado de coprocessador matemático.

Mesmo tratando-se de um código sem recursos gráficos, este programa tem grande importância científica, tendo em vista que serviu de base para o desenvolvimento de alguns dos programas comerciais atualmente em uso, e por estar

disponível em linguagem fonte, possibilitando modificações e compreensão dos algoritmos usados.

4.1.1 Descrição do Sistema

As informações necessárias para a solução de uma rede de ventilação são fornecidas para o programa através de quatro arquivos de dados. O primeiro destes arquivos contém alguns parâmetros de execução do programa e os dados relativos aos ramos que compõem o circuito considerado. Um outro arquivo contém os dados referentes às curvas características dos ventiladores existentes no circuito. Um terceiro arquivo é dotado dos dados sobre mudanças que porventura se queiram efetuar no circuito corrente. Finalmente, caso se deseje um tratamento termodinâmico para o circuito, se dispõe de um arquivo com dados de elevação e temperaturas (seca e úmida) dos nós, que permitem determinar as pressões de ventilação natural nos ramos onde elas ocorrem.

O programa estabelece um número de malhas dentro da rede de ventilação de acordo com a relação

$$m = b - j + 1$$

onde

$$m = n.^{\circ} \text{ de malhas}$$

$$b = n.^{\circ} \text{ de ramos}$$

$$j = n.^{\circ} \text{ de nós}$$

Uma solução inicial, que satisfaz a equação de continuidade em cada nó, é encontrada. Esta solução é então refinada progressivamente pelo método de Hardy-Cross até que o grau de precisão estipulado pelo usuário seja alcançado em todas as malhas.

Alterações podem ser feitas no circuito corrente, e cada conjunto de alterações terá seus efeitos analisados através da solução correspondente encontrada.

4.1.2 Tipos de Ramo

Os ramos de um circuito podem ser classificados de acordo com suas características, em cinco tipos:

1. Ramo normal, no qual a queda de pressão é calculada por $p = RQ^2$.
2. Ramo com regulador, no qual a queda de pressão é calculada por $p = RQ^2$, com Q sempre menor ou igual ao fluxo regulado especificado.
3. Ramo com ventilador, no qual a queda de pressão é calculada por $p = RQ^2 - F(Q_i)$, onde $F(Q_i)$ é a pressão do ventilador i à taxa de fluxo de ar Q da sua curva característica.
4. Ramo com fluxo fixo, onde Q é sempre igual à Q' , sendo Q' o fluxo constante estabelecido para o ramo.
5. Ramo de característica linear, no qual $p = RQ$, onde R representa a resistência linear em fluxo laminar (áreas já mineradas e portas de ventilação de alta resistência).

4.1.3 Convenções de Sinal

Os ramos dentro do circuito são orientados do nó inicial para o nó final, conforme definido no arquivo dos dados de entrada. O fluxo é considerado positivo, em um determinado ramo, quando flui segundo essa orientação naquele ramo. Da mesma forma, a pressão de um ventilador é considerada positiva se este direciona o fluxo de ar do nó inicial para o nó final do ramo onde atua.

O conhecimento das convenções de sinal torna-se importante tanto na leitura dos resultados da execução quanto na entrada de valores, tais como: fluxo fixo, fluxo regulado, número da curva de ventilador, pressão de ventilação natural e fluxo inicial em um ramo.

Para o número da curva de ventilador, um sinal negativo significa que o ventilador está soprando no sentido do nó final para o nó inicial. Da mesma forma, no caso de reguladores, se o sentido do fluxo é do nó final para o nó inicial, o valor do fluxo máximo deve vir acompanhado de sinal negativo.

4.1.4 Restrições ao Circuito

Para que seja possível a solução de um circuito de ventilação pelo método de Hardy-Cross, é necessário que não haja mais de um ramo com regulador ou com fluxo fixo em uma mesma malha fechada, sem que haja algum ramo de qualquer outro tipo que possa permitir um caminho alternativo para o fluxo, ou seja, a formação de uma nova malha. Isto decorre da aplicação da 2ª Lei de Kirchhoff na solução de redes de ventilação, que estabelece que a soma dos fluxos de ar em uma malha fechada deve ser zero. Se os fluxos têm valores fixados para dois ou mais ramos em uma mesma malha, o circuito não poderá ser resolvido, e o programa emitirá uma mensagem de erro.

4.1.5 O Controle do Programa

As diferentes partes do programa são selecionadas pelo usuário, através de códigos de controle, representados pelos algarismos de 1 a 9. As diversas opções de execução do programa, correspondentes a cada código de controle, são as seguintes:

Código 1 – Os dados do circuito inicial são lidos do arquivo de ramos;

Código 2 – O circuito é resolvido e os resultados emitidos para o arquivo de saída;

Código 3 – Para o caso de alterações no circuito inicial, o programa lê uma série de registros do arquivo de mudanças no circuito;

Código 4 – Os dados das curvas características dos ventiladores são lidos do arquivo de ventiladores;

Código 5 – As malhas levantadas pelo programa para solucionar as equações de Kirchhoff, são impressas no arquivo de saída corrente. Os ramos de cada malha são impressos começando pelo ramo independente que estabelece a direção do fluxo na mesma. Os outros ramos são impressos em ordem, definidos por um número inteiro com sinal. O sinal fornece a direção do fluxo no ramo com relação à direção do ramo independente, e o número inteiro é o mesmo que define cada ramo no arquivo lido pelo programa;

Código 6 – Um novo arquivo de ramos é criado com os valores de fluxo gerados pela última solução;

Código 7 – O arquivo que contém os dados de temperaturas (de bulbo seco e úmido) e elevação dos nós é lido pelo programa que calcula, a partir desses dados, a pressão de ventilação natural em cada malha;

Código 8 – O programa suprime a listagem dos dados de entrada no arquivo de saída se comandado antes do código de controle que inicia a leitura daqueles dados;

Código 9 – A execução é encerrada.

4.1.6 Definição dos Parâmetros de Execução

O primeiro registro no arquivo de dados dos ramos define três parâmetros de execução, que são:

- Número máximo de iterações. Este valor refere-se ao maior número de iterações que o programa deve executar na solução do circuito, caso a precisão desejada não seja obtida.
- Precisão requerida. Estabelece o valor máximo do fator de correção a ser aplicado em qualquer malha do circuito. Se todos os fatores de correção após uma dada iteração são menores que este valor, o cálculo é encerrado.
- Coefficiente de conversão. É o fator que transforma as unidades de energia para potência. Este fator depende do sistema de unidades usado na análise.

Valores recomendados destes parâmetros, juntamente com as unidades de pressão e vazão, para o Sistema Inglês e o Sistema Internacional de unidades, são mostrados na Tabela 4.1 .

Os formatos e campos especificados para os parâmetros de execução são mostrados no Anexo 2.

Tabela 4.1 - Unidades de pressão, vazão e valores recomendados dos parâmetros de execução usados no programa VPROG nos sistemas Inglês e Internacional de unidades.

PARÂMETRO / GRANDEZA	SISTEMA INGLÊS	SISTEMA INTERNACIONAL
Vazão	105 cfm	m ³ /s
Pressão	inches WG	N/m ² (Pa)
Precisão requerida	0,0001	0,005
Coefficiente de conversão	15,76 (p/HP)	0,00134 (p/HP) 0,001 (p/KW)
Máximo n.º de iterações	30	30

Fonte: MAPAO (1989).

4.1.7 Definição dos Ramos

Os ramos que formam o circuito objeto da análise são definidos através de registros com as seguintes informações:

- Nós inicial e final (número inteiro até 9999).
- Tipo do ramo (1, 2, 3, 4, ou 5).
- Resistência do ramo (pode ser igual a zero).
- Fluxo estimado. Um fluxo estimado, diferente de zero e com sinal apropriado, deve ser especificado para cada ramo. Não será necessário que todos os valores estimados estejam equilibrados em cada nó, porém, se a estimativa inicial estiver mais próxima da realidade, a convergência ocorrerá com um menor número de iterações.
- Dado adicional. Ramos dos tipos 2, 3 e 4 requerem uma informação complementar. Para ramo do tipo 2, o dado adicional é o fluxo máximo permitido em uma direção determinada. Um ramo do tipo 3 requer o número da curva característica do ventilador, que consta do arquivo de dados dos ventiladores. Finalmente, para um ramo do tipo 4, deve-se fornecer o valor do fluxo fixo naquele ramo, que deve ser igual ao fluxo estimado para o mesmo.
- Pressão de ventilação natural (pode ser igual a zero).

A presente versão do programa admite até um máximo de 400 ramos por circuito. Este valor máximo poderá ser ampliado, se necessário, alocando mais espaço para os vetores e matrizes do programa, desde que haja espaço de memória RAM no computador. Os formatos e campos especificados para os dados dos ramos estão no Anexo 2.

4.1.8 - Definição dos Ventiladores

Um ventilador é representado no circuito por valores de pressão e vazão que definem a sua curva característica. As curvas características são referenciadas por um número real dotado de sinal. Várias curvas características podem ser sucessivamente associadas com um único ramo, e uma mesma curva característica pode estar simultaneamente associada com vários ramos.

Uma curva característica é definida no arquivo de dados por uma série de 2 a 7 pontos no quadrante positivo do plano F - Q , onde $Q_j < Q_{j+1}$ e $F_j > F_{j+1}$, conforme Figura 4.1 .

Os primeiro e último valores de fluxo definem a faixa de operação normal do ventilador. No programa, a curva característica é prolongada aquém e além das taxas de fluxo limitantes, com valores constantes de pressão, conforme mostra a Figura 4.1 . Se a solução for encontrada numa dessas faixas prolongadas, uma mensagem desta ocorrência será emitida nos resultados. Na faixa normal, uma interpolação linear entre os pontos mais próximos é executada.

Até 40 curvas características podem ser armazenadas no arquivo dos ventiladores. Este arquivo atua como um inventário de vários tipos de ventiladores que poderão ser requeridos numa determinada análise. Além da curva $F \times Q$, a eficiência de cada ventilador é também armazenada no arquivo dos ventiladores.

Instalações de ventiladores múltiplos podem ser simuladas pela adição de ramos fictícios do tipo 3 entre um par de nós. Quando em série, estes ramos representam ventiladores em série. A adição de ramos fictícios em paralelo, entre um mesmo par de nós, representa ventiladores em paralelo. Os ramos fictícios devem ter resistência zero. Os formatos e campos especificados para os dados dos ventiladores são mostrados no Anexo 2.

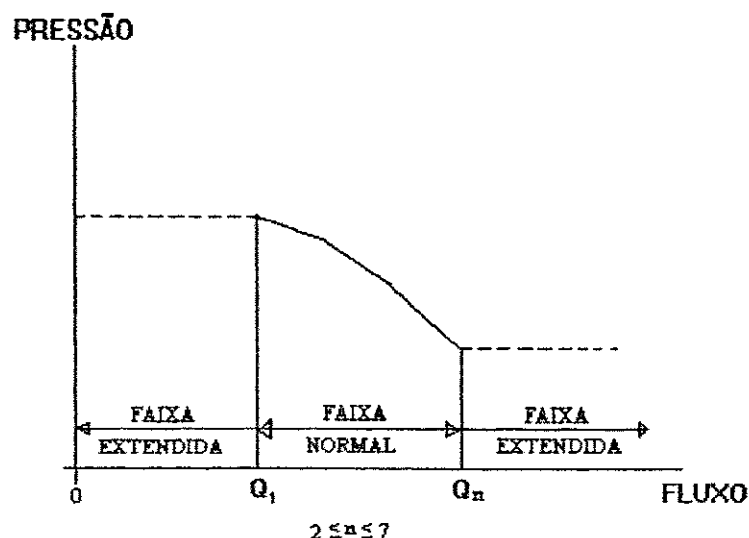


Figura 4.1 - Curva característica de ventilador.
Fonte: MAPAO (1989).

4.1.9 Mudanças no Circuito

As alterações no circuito corrente, que são lidas do terceiro arquivo de dados, podem ocorrer pela adição e/ou eliminação de ramos e/ou por mudanças nos parâmetros previamente definidos para um ramo. Cada alteração no circuito é definida por um registro, e o número que consta da coluna 1 de cada registro identifica o tipo de mudança conforme as convenções seguintes:

1. altera os parâmetros do ramo;
2. adiciona um novo ramo;
3. elimina o ramo.

O restante do registro de alteração é semelhante a um registro de definição de ramo. Para mudanças do tipo 1, uma completa redefinição do ramo é requerida, mesmo que somente um parâmetro seja alterado. Para mudanças do tipo 3, apenas os números dos nós são requeridos. Como os ramos são reconhecidos por seus nós extremos, se há mais que um ramo conectando um dado par de nós, somente o primeiro ramo lido pelo programa, através dos dados iniciais de entrada ou através de

mudanças no circuito, pode ser alterado ou eliminado. Entretanto, um número de tais ramos deve ser eliminado pela leitura sucessiva do mesmo registro de eliminação.

Os formatos e campos especificados para os dados de mudanças no circuito são mostrados no Anexo 2.

4.1.10 Opção Termodinâmica

Através do código de controle 7, um tratamento termodinâmico pode ser aplicado à rede de ventilação, quando dados de temperatura são disponíveis.

Com dados de pressão barométrica e temperaturas de bulbo seco e úmido de um ponto de elevação conhecida, uma densidade de ar de referência é calculada. A partir dessa densidade de referência, o programa ainda calcula a pressão de ventilação natural (NVP) nas malhas previamente estabelecidas. Essas pressões de ventilação natural são adicionadas aos ramos independentes de cada malha antes da solução do circuito.

Para o cálculo da NVP, o programa requer, além dos dados referidos acima, a elevação e temperaturas de bulbo seco e úmido de cada nó da rede de ventilação. No Anexo 2, referente aos arquivos de dados de entrada, encontram-se os formatos e campos especificados desses dados.

4.1.11 O Arquivo dos Resultados

Quando o código de controle 2 é selecionado, e não sendo encontrados erros nos dados de entrada, o programa resolve o circuito, cria e imprime um arquivo de saída com os seguintes resultados:

1. O número de iterações feitas.
2. A soma dos valores absolutos da última correção de todas as malhas.

3. Para cada ramo:

- O fluxo com sinal indicativo da sua direção.
- A queda de pressão devida à resistência do ramo.
- A pressão, gerada por um ventilador, ou perda através de um regulador, para ramos do tipo 2, 3 ou 4.
- A potência do ar consumida pelo ramo.
- A pressão total no ramo, obtida pela soma da queda de pressão devida à resistência mais qualquer pressão de ventilação natural mais qualquer perda ou ganho de pressão devido a regulador ou ventilador.

4. Para ramos do tipo 2, 3 e 4 uma mensagem é emitida:

- Para ramos do tipo 2; indicando se o fluxo é restrito ao máximo permitido naquele ramo.
- Para ramos do tipo 3, fornecendo a potência consumida pelo ventilador.
- Para ramos do tipo 4, indicando se o ramo está operando com ventilador (neste caso, a potência do ar do ventilador é dada) ou com regulador.

5. A potência total requerida pelo circuito. Neste valor está incluído o efeito das várias eficiências dos ventiladores, desde que eles estejam operando dentro de sua faixa;

6. Um índice de convergência, que é uma medida da diferença entre a energia gerada pelos ventiladores e a energia consumida pelos ramos. Ele seria igual a zero, para uma perfeita convergência;

7. Listagem dos ramos com uma mudança no fluxo de mais de 10% do valor inicial estimado, bem como dos valores (final e inicial) do fluxo;

8. A pressão existente nos nós, com relação à pressão atmosférica.

4.1.12 - Procedimentos Práticos

Alguns procedimentos para se obter melhores resultados na utilização do programa VPROG são recomendados a seguir.

O uso do código de controle 6, após a solução da rede através do código 2, causará um novo conjunto de dados dos ramos a ser gerado em disco, porém com os valores de fluxo calculados na solução da rede primária. Um arquivo denominado BALANCED.SOL será criado com estes dados, podendo ser renomeado para BRANCH.DAT, e utilizado como entrada em execuções subseqüentes. Este recurso resultará em uma maior eficiência, pois o programa é executado a partir de uma rede balanceada, e os efeitos de mudanças no circuito serão identificados com mais facilidade. Deve ser evitado o uso excessivo de ramos regulados ou fixos no modelo a ser analisado, para que resultados irreais não sejam obtidos.

Como as portas de ventilação em uma mina raramente são bem vedadas, com freqüência elas são responsáveis por 10 a 50% do vazamento de ar. Por isso é conveniente modelá-las como ramos de alta resistência.

4.2 PROGRAMA VENTSIM®

A descrição do programa VentSim é simplificada por tratar-se de um código comercial ativo e de larga aplicação, Stuart, 1998. O programa possui um sistema de ajuda *on line*, que impresso em sua totalidade compreende um manual de 29 páginas

4.2.1 Plataforma

O programa VentSim versão 2.8 é executável na plataforma mais comum atualmente, a saber:

- IBM PC compatível, processador 386 ou acima;

- Disco rígido;
- Mouse;
- Monitor colorido VGA;
- 8 Mb de RAM mínimo;
- Windows 95 ou Windows NT;

4.2.2 Características Gerais

Em sua concepção geral o programa VentSim funciona com um único arquivo de dados em formato ASCII para cada sistema de ventilação. Através da interface gráfica e em menus para entrada de dados. O usuário geralmente não necessita de tomar conhecimento destes arquivos, exceto quando quiser importar / exportar dados de / para outros aplicativos.

O programa funciona em um ambiente totalmente integrado de entrada gráfica / numérica de dados, visualização de dados em variadas opções, solução numérica e detecção de erros, exibição gráfica dos resultados em diversas formas, impressão, e importação / exportação de dados. A tela básica deste ambiente que segue o padrão Windows® é mostrada na Figura 4.2.

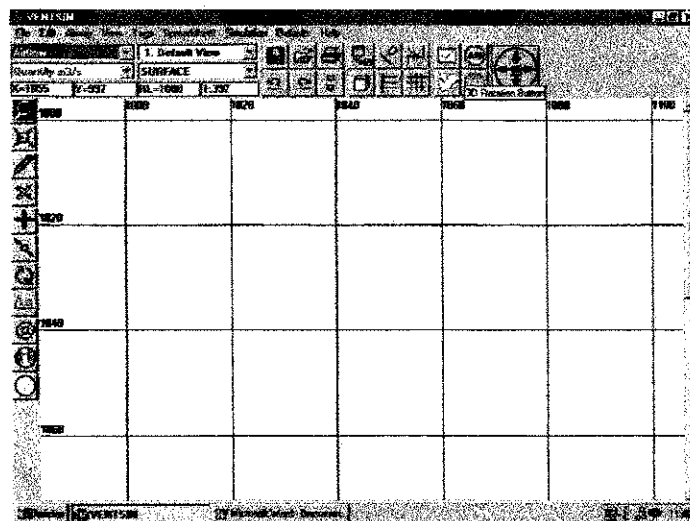


Figura 4.2 – Ambiente integrado do programa VentSim.
Fonte: Stuart (1998).

4.2.3 Entrada de Dados

Os dados necessários à definição de uma rede de ventilação são basicamente os mesmos usados em outros programas, incluindo o programa da MAPAO da seção anterior. Os dados sobre a geometria da rede, incluindo as características dos ramos podem ser entrados diretamente via mouse, via teclado, ou de modo misto. O programa possui grande flexibilidade quanto à definição de malhas em níveis diferentes. Cálculos de resistência são realizados automaticamente pelo programa a partir de dados geométricos e características de rugosidade dos ramos. Para diversos parâmetros podem ser atribuídos valores padrão.

Os dados podem ser visualizados e manipulados em forma de caracteres através de uma planilha embutida no menu principal (*spreadsheet*), que tem a forma vista na Figura 4.3.

No.	Nome	From	To	Length	Flow	Duct	Resistance	K-Factor	Fan	F-Plus	Height	Width	Comments	X1	X2
1	RP-Entrada I			55	17,9	1	0,00390	0,0200			4,8	4,5		1168	10
2	RP-Entrada /			42	35,1	4	0,00322	0,0200			4,8	4,5		1000	10
3	Ent N-90			50	10,8	40	0,34406	0,0200			2,5	2,5		1217	9
4	RP			18	17,9	1	0,00197	0,0200			4,8	4,5		1139	10
5	RP			113	17,9	2	0,00691	0,0200			4,8	4,5		1124	10
6	RP			21	17,9	1	0,00216	0,0200			4,8	4,5		1011	10
7	RP			20	17,9	1	0,00207	0,0200			4,8	4,5		993	10
8	RP			18	17,9	1	0,00199	0,0200			4,8	4,5		993	10
9	RP			13	35,1	2	0,00174	0,0200			4,8	4,5		998	10
10	RP			212	53,1	34	0,01200	0,0200			4,8	4,5		1006	10
11	RP			124	63,8	30	0,00740	0,0200			4,8	4,5		1217	10
12	RP			23	63,8	9	0,00224	0,0200			4,8	4,5		1341	10
13	TR			11	24,9	2	0,00316	0,0200			4,8	4,5		1364	10
14	RP			106	39,0	10	0,00654	0,0200			4,8	4,5		1364	10
15	CH 110/135			30	24,9	125	0,20190	0,0200				2,2		1366	10
16	RP			18	39,0	3	0,00200	0,0200			4,8	4,5		1470	10
17	RP			11	39,0	2	0,00164	0,0200			4,8	4,5		1495	10
18				0	63,8	1	0,00010	0,0100			5	5		1635	10
19				146	63,8	0	0,00193	0,0100			5	5		1489	10
20	Chamine exa			121	63,8	083	0,21663	0,0050	1	907		1,8		1639	10
21	RP			18	24,9	1	0,00199	0,0200			4,8	4,5		1480	10
22	RP			18	24,9	1	0,00200	0,0200			4,8	4,5		1462	10
23	RP			101	24,9	5	0,00047	0,0200			4,8	4		1363	10
24	D			20	12,3	347	2,29191	0,0050	2	1332		1		1370	10
25	CH 135/160			28	12,5	19	0,12230	0,0200				2,2		1370	10
26	D			72	12,3	453	2,99099	0,0050				1		1380	10
27	RA			21	12,3	0	0,00214	0,0200			4,8	4,5		1367	10
28	RP			99	12,5	1	0,00618	0,0200			4,8	4,5		1266	10
29	RA			20	12,3	0	0,00130	0,0200			4,8	4,5		1376	10
30	RA			70	12,3	1	0,00465	0,0200			4,8	4,5		1378	9
31	D			30	6,5	411	9,64562	0,0050				0,7		1300	9*

Figura 4.3 – Dados sobre uma rede de ventilação em forma de planilha do VentSim.

Os dados referentes à definição de níveis devem ser supridos com o preenchimento da planilha exibida na Figura 4.4, enquanto que os dados referentes aos ventiladores são mostrados na planilha da Figura 4.5. Estas planilhas são igualmente ativadas através do item *spreadsheet* da tela principal.

No	Name	RL High (m)	RL Low (m)
1	Superficie	360	359
2	Subsolo	359	150
3			
4			
5			
6			
7			
8			

Figura 4.4 – Dados para definição de níveis em forma de planilha do VentSim.

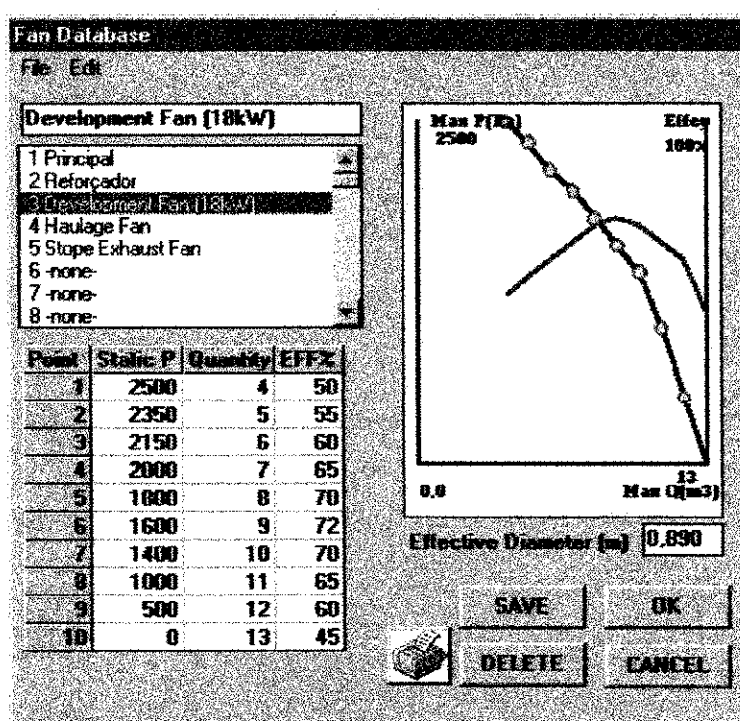


Figura 4.5 – Dados para definição de curvas de ventiladores em forma de planilha do VentSim.

4.2.4 Execução do Programa

A execução do programa para solução numérica da rede é ativada no menu principal, através das duas opções *AIR* e *GAS*. A primeira opção resolve a rede para a determinação de fluxos, enquanto que a segunda simula a concentração de contaminantes nos diversos ramos da rede. Apenas a primeira opção foi utilizada nesta pesquisa.

Caso a rede contenha erros, com ramos sem entrada ou saída, o programa emite mensagem indicando os locais de erro. Um mensagem é também emitida caso a solução não apresente convergência, podendo neste caso o usuário optar por continuar iterando, ou terminar a execução com uma solução não balanceada.

Para a rede usada aqui, com microcomputador 486 de 66Mz, a solução é executada em cerca de 4 segundos apenas.

4.2.5 Resultados

Os resultados do programa podem ser apresentados nas seguintes formas: fluxo, velocidade, pressões manométricas ou barométricas, diferenças de pressão, ou potência. Os resultados são exibidos em forma de números junto com a rede de ventilação, com diversas possibilidades gráficas, incluindo: resultados por níveis isolados, vista em planta, seção transversal, seção longitudinal, ou perspectiva isométrica. A saída pode ser rotacionada e ampliada por setores (*zoom*), conforme visto na Figura 4.6, para os fluxos de ar da rede usada nesta pesquisa.

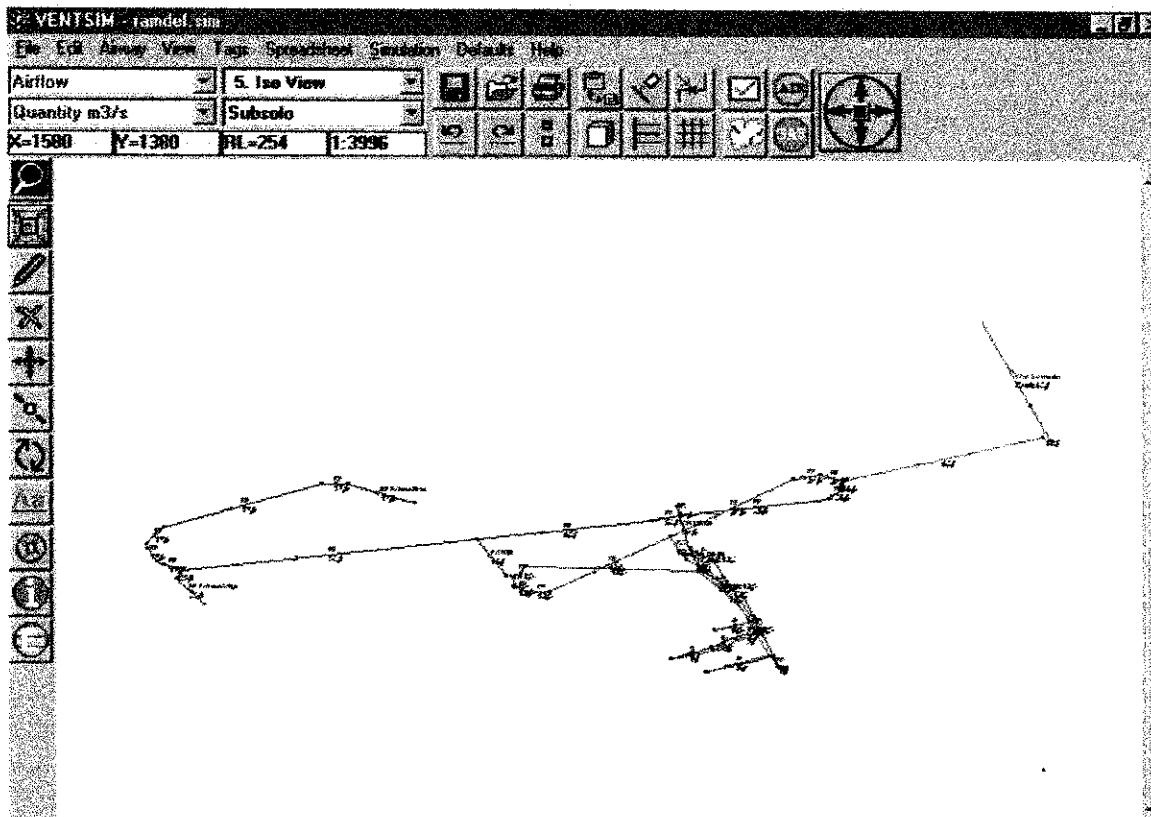


Figura 4.6 – Saída do programa VentSim mostrando fluxos de ar.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS E MEDIÇÕES

O presente capítulo trata da aplicação da análise de redes ao circuito de ventilação da mina Medrado.

Apesar deste trabalho de pesquisa ter sido executado em duas fases distintas (Dezembro de 1996 e Março de 1998), onde em cada uma das etapas, o circuito de ventilação apresenta características próprias e diversas, a metodologia aplicada na coleta dos dados e alguns parâmetros relativos aos circuitos apresentam características comuns, motivo pelo qual são apresentados uma única vez.

Por outro lado, as vazões medidas e os resultados obtidos em cada etapa são tratados separadamente, em virtude da diversidade existente, com relação a estes tópicos, entre as duas etapas da pesquisa.

5.1 DADOS GERAIS SOBRE A MINA MEDRADO

A mina Medrado, pertencente ao Grupo FERBASA, localizada no município de Andorinha-BA, foi escolhida para aplicação do estudo de análise de circuitos de ventilação, objeto do presente trabalho, por apresentar algumas vantagens de ordem operacional.

Por estar a pouco tempo em operação, apesar de contribuir com a maior parcela da produção total de cromita da Empresa, a mina Medrado apresenta um

layout com pouca complexidade, o que viria a permitir a representação do circuito básico de ventilação e a partir dele um maior número de simulações, dentro do tempo disponível, para estas etapas, no cronograma de atividades previsto no projeto de dissertação.

Merece registro, também, o fato de o atual sistema de ventilação desta mina, ainda não se encontrar completamente instalado, necessitando de algumas definições para tal, o que tornaria mais interessantes as conclusões tiradas a partir do estudo realizado.

Finalmente, algumas conclusões extraídas do trabalho inicial poderiam ser úteis na análise do sistema de ventilação das minas Ipueira I, II e III, instaladas no mesmo corpo mineralizado, e em estágio de lavra bem mais avançado.

5.1.1 Características da Lavra

O método de lavra empregado na mina Medrado é o de abatimento por subníveis (*sublevel caving*), utilizando a metodologia de abertura de galerias de produção na capa (*footwall*) da camada, com desmonte em recuo e abatimento do teto. Os painéis de lavra alcançam em média 12 a 14m de altura, cuja perfuração, efetuada com *fandril*, apresenta sentido ascendente e em leque.

Para o transporte do R.O.M. são utilizadas carregadeiras LHD, com capacidade de 9 t, que carregam o material desmontado das galerias de produção até os pontos de carregamento de cada nível, onde o material é despejado em caminhões com capacidade de 22 t, que o levam à superfície.

A Figura 5.1 é uma vista tridimensional da mina Medrado, gerada através do programa gráfico AutoCad, na qual se pode visualizar, além da rampa principal, os diversos níveis de extração (N-90, N-110, N-135, N-145) e o início da rampa de acesso ao nível 160 (nível mais inferior).

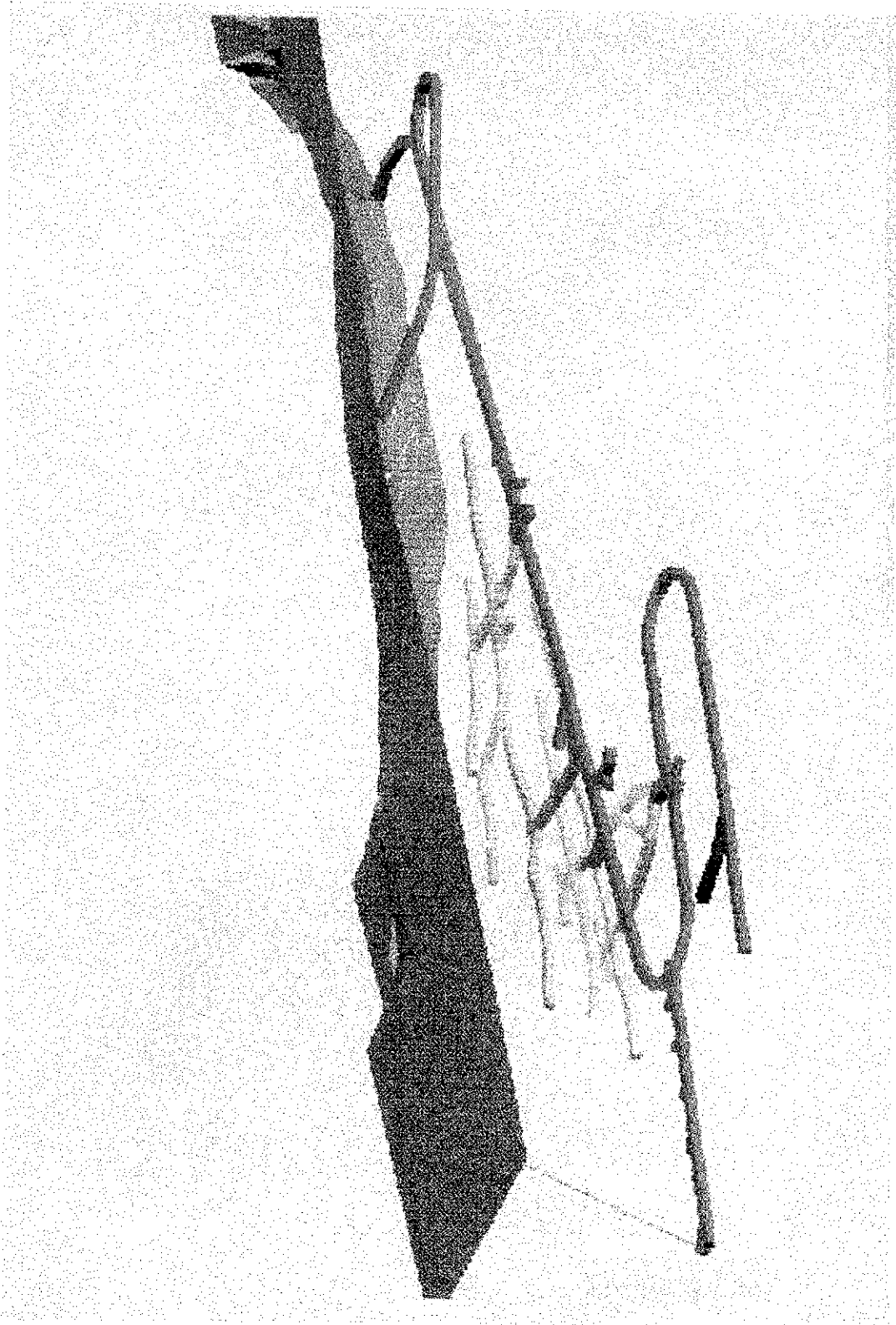


Figura 5.1 – Vista tridimensional da Mina Medrado.
Fonte: Mineração do Vale do Jucurici – BA (1996).

5.1.2 Características Gerais do Sistema de Ventilação

No sistema de ventilação inicialmente utilizado na mina Medrado, do tipo soprante, o ar era levado através de dutos de vinilona até as frentes de lavra, de onde retornava pelas galerias e rampas de acesso até a superfície. Com a conclusão dos trabalhos de abertura de uma chaminé do nível 125 para a superfície (ocorrida em setembro de 1996), parte da corrente do ar de retorno passava por esta chaminé. A maior parte desta corrente de retorno, no entanto, era recolhida à superfície, na entrada da mina, através da rampa principal de acesso, devido à menor resistência que este percurso oferece à corrente de ventilação, em relação ao percurso que inclui a referida chaminé.

Tendo em vista a necessidade de se ter uma corrente de ar de melhor qualidade na rampa, onde existe um maior fluxo de pessoal, e considerando que o trecho considerado (do início da travessa de acesso à chaminé, até a entrada da mina) é bastante extenso; seria de bom alvitre que todo o fluxo da corrente de retorno (ar viciado), fosse recolhido à superfície, pela chaminé. Esta situação seria obtida através da instalação de um ventilador, operando por sucção, no topo da chaminé de ventilação. Esta opção de ventilação por sucção foi implementada a partir de Março de 1998, vindo a compor a parte seguinte desta pesquisa.

A Figura 5.2 apresenta planta de um trecho do circuito de ventilação utilizando o sistema soprante, enquanto a Figura 5.3 mostra o projeto de ventilação utilizando o sistema aspirante, atualmente utilizado.

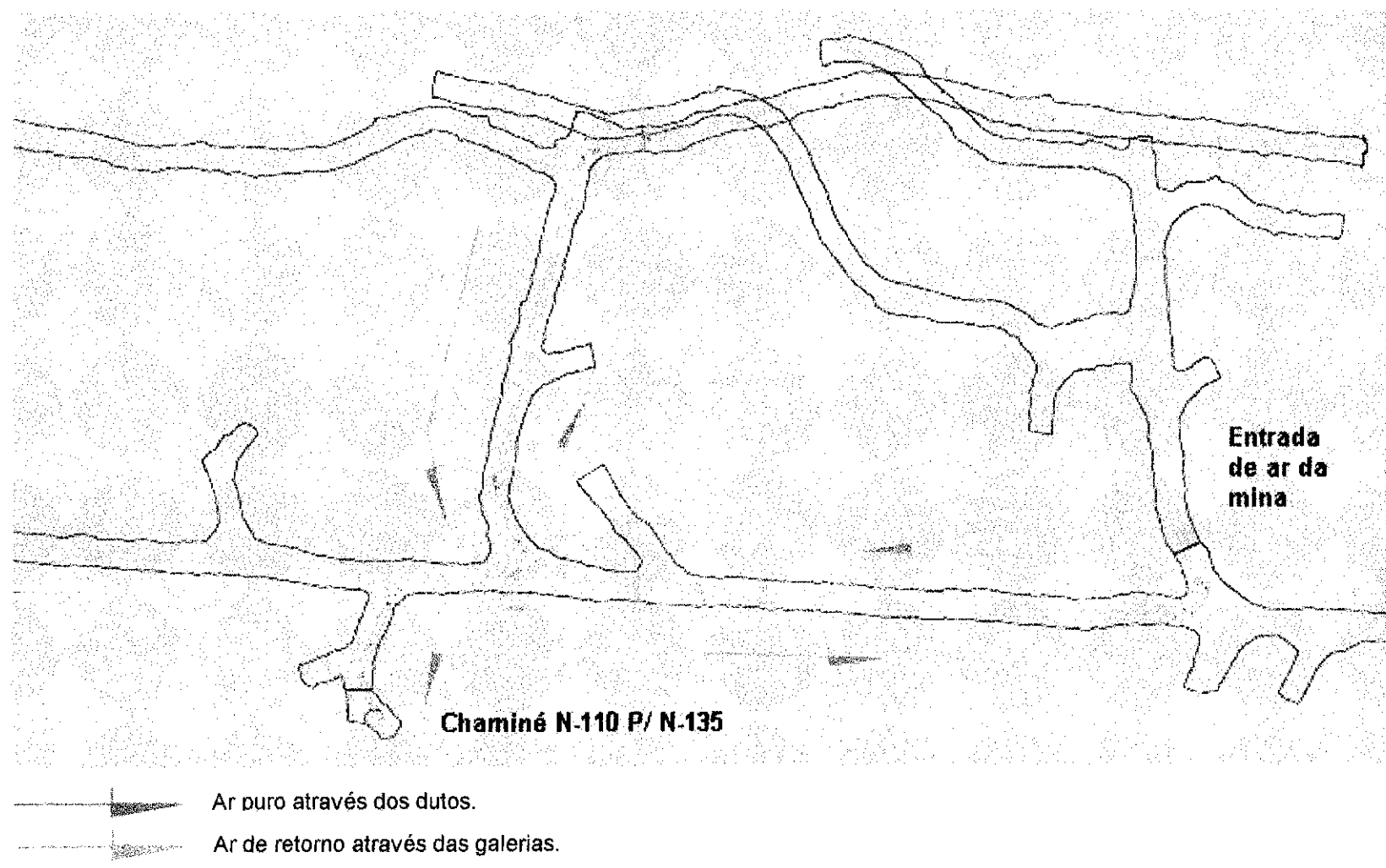


Figura 5.2 – Detalhe do circuito de ventilação da mina Medrado usando o sistema soprante.
Fonte: Mineração do Vale do Jucurici – BA (1996).

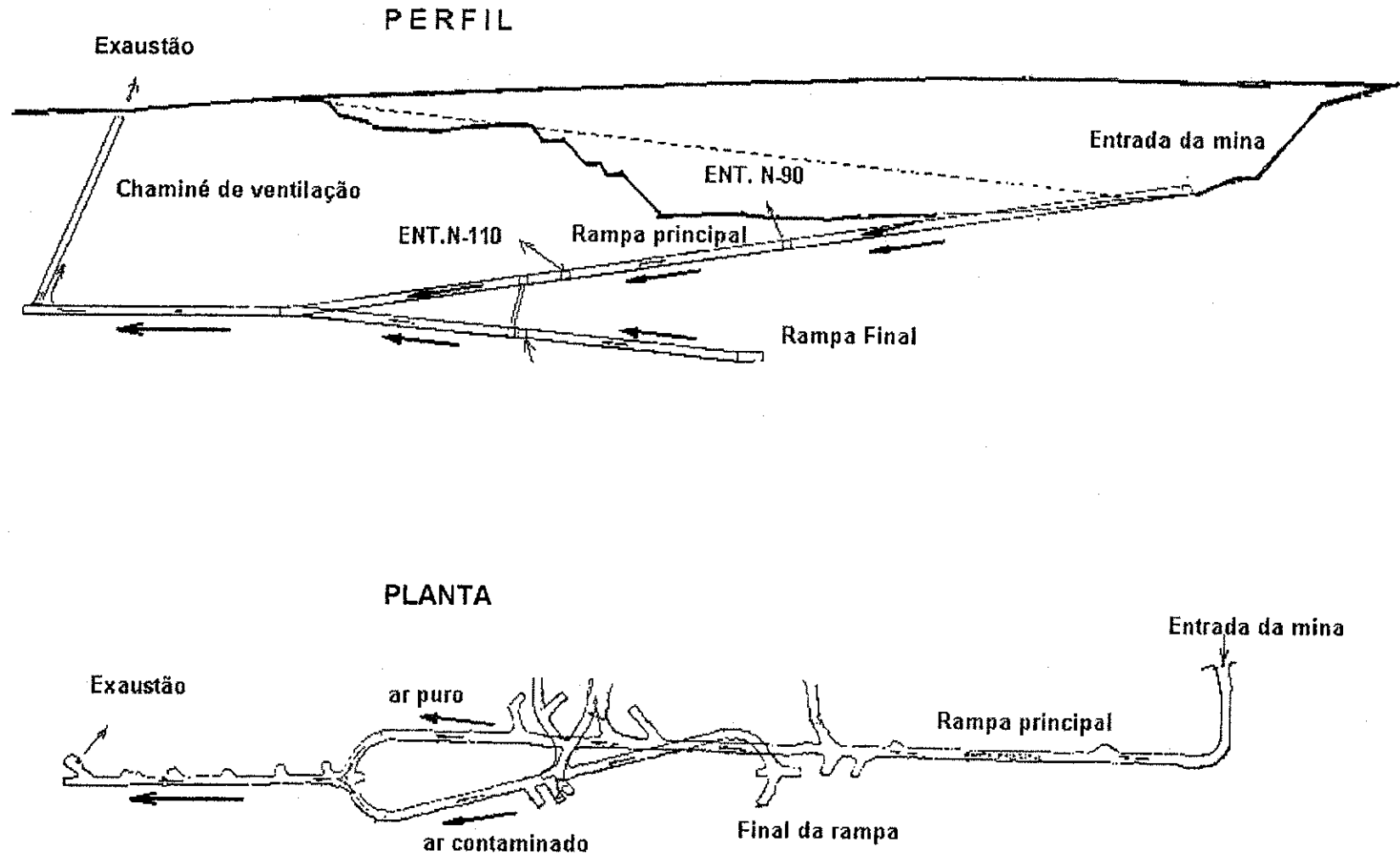


Figura 5.3 – Circuito de ventilação por sucção atualmente utilizado na mina Medrado.
Fonte: Mineração do Vale do Jucurici – BA (1996).

5.2 MEDIÇÕES EFETUADAS NA MINA

Foram efetuadas medições para o cálculo das vazões da corrente de ar nos pontos de descarga dos dutos de ventilação, nas diversas frentes de trabalho, para posterior comparação com os resultados obtidos com a análise da distribuição do fluxo de ar, através do programa computacional, com a utilização dos dados característicos do sistema de ventilação vigente.

Os dutos utilizados para levar a corrente de ventilação até as frentes de trabalho da mina Medrado são de vinilona e circulares; com diâmetro de 1000 mm ou de 700 mm. Normalmente são feitas amarrações no ponto de descarga do duto, que provocam estrangulamento dos mesmos (diminuição da seção). Por estarem amarrados ao teto da galeria apresentam na saída a forma aproximada de uma elipse, em vez da forma circular. A Figura 5.4 ilustra esta situação.

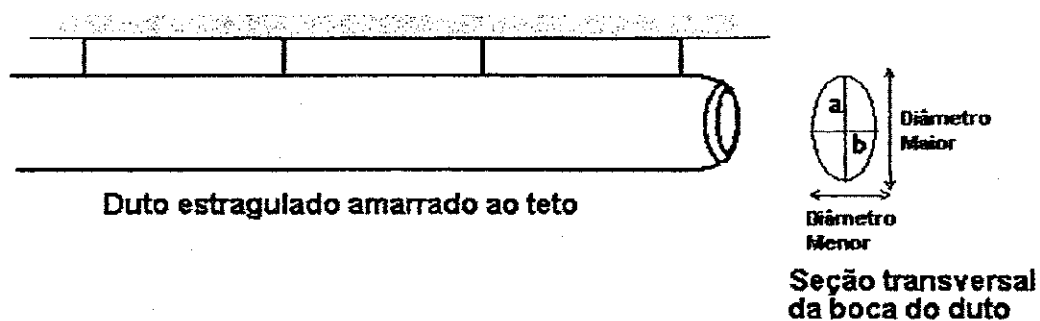


Figura 5.4 – Duto de ventilação.

A metodologia aplicada para a determinação das vazões nos pontos de descarga dos dutos foi a seguinte:

1. Medição dos diâmetros maior e menor da seção da saída do duto, para obtenção dos semi-eixos a e b .
2. Medição, através de anemômetro, da velocidade da corrente de ventilação na saída do duto. A velocidade considerada nos cálculos é a média de

valores de velocidade (normalmente cinco), obtidos com a colocação do anemômetro em pontos distintos da seção medida.

3. Cálculo da vazão, pela utilização da fórmula $Q = VA$, onde Q representa a vazão do ar na saída do duto, V é a velocidade média da corrente na saída do duto, e A é a área da seção da saída do duto (πab).

5.3 PARÂMETROS DO CIRCUITO

Para a análise de um circuito de ventilação e sua solução, se faz necessária a definição de alguns parâmetros característicos dos elementos que o compõem.

5.3.1 Fatores de Fricção

Foram adotados quatro valores específicos de K , um para cada tipo de ramo, de acordo com suas características:

1. Para a chaminé que liga o nível 125 à superfície, por ter sido aberta com "raise borer", escolheu-se na tabela o tipo "smooth lined". Por não apresentar, praticamente, irregularidade de área e alinhamento; e por se considerar a presença de escadas e tubulações, estimou-se para o fator de fricção, o valor correspondente ao mínimo de irregularidades com leve obstrução, ou seja, $K=0,0027825 \text{ Kg/m}^3$.
2. Para as rampas, travessas e galerias, adotou-se o tipo de abertura em rocha ígnea com grau médio de irregularidades de área e alinhamento e obstrução leves, ou seja, $K=0,027825 \text{ Kg/m}^3$.
3. Para a chaminé que liga o nível 110 ao nível 135, escolheu-se o fator de fricção correspondente a uma abertura em rocha ígnea, com o mínimo de irregularidades e sem obstruções, ou seja, $K=0,016695 \text{ Kg/m}^3$.

4. Para os duetos de ventilação, por serem de material flexível (vinilona) e estarem relativamente usados, de acordo com a tabela para duetos (Hartman, 1982, p. 153), adotou-se o valor $K=0,0046 \text{ Kg/m}^3$.

5.3.2 Resistências Unitárias

Os diferentes tipos de ramo existentes na mina Medrado foram agrupados de acordo com suas dimensões e características, resultando em seis valores diferentes de resistência unitária R_u , calculados com base nas referidas dimensões e nos valores de K estimados acima:

1. Para a chaminé N-125/Superfície, que apresenta forma circular com 1,8 m de diâmetro, o valor calculado da resistência unitária é $R_u=0,0009558 \text{ Kg/m}^7$.
2. Para as rampas, que apresentam seção transversal média de 4,5 m x 4,8 m, o valor calculado da resistência unitária é $R_u=0,0000514 \text{ Kg/m}^7$.
3. Para as galerias e travessas, que apresentam seção transversal média de 3,7 m x 3,9 m, o valor calculado da resistência unitária é $R_u=0,0001408 \text{ Kg/m}^7$.
4. Para a chaminé N-110/N-135, que apresenta forma circular com 2,2 m de diâmetro, o valor calculado da resistência unitária é $R_u=0,0013610 \text{ Kg/m}^7$.
5. Para os duetos de 700 mm de diâmetro, o valor calculado da resistência unitária é $R_u=0,1776594 \text{ Kg/m}^7$.
6. Para os duetos de 1000 mm de diâmetro, o valor calculado da resistência unitária é $R_u=0,0298592 \text{ Kg/m}^7$.

5.4 ANÁLISE DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO ANTERIOR

Nesta seção são mostrados os resultados das medições efetuadas na mina e os procedimentos adotados para a elaboração dos dados de entrada do programa VPROG (MAPAO, 1989), além de uma análise e comparação dos resultados obtidos.

5.4.1 Resultado das Medições

As medições foram feitas nos pontos de descarga dos dutos, nos diversos níveis da mina; em galerias, pontos de carregamento (ou pontos de apoio) das rampas de acesso, e em locais como escritório da mina e central de concreto.

Como exemplo, temos as seguintes medidas e valores obtidos na descarga do duto de 1000 mm no ponto de apoio (PA) da rampa de acesso N-145 (nível 145):

Valores medidos da velocidade do ar (m/s): 10,5 ; 10,5 ; 11,5 ; 10,7 e 10,3

*Medidas da seção na saída do duto (m): diâmetro maior: 0,30
diâmetro menor: 0,20*

Velocidade média da corrente de ar: 10,7 m/s

Área da seção do duto (na saída): 0,05 m²

Vazão do ar na saída do duto: 0,54 m³/s

A Tabela 5.1 fornece os valores de todos os pontos de descarga medidos seguindo a ordem dos níveis superiores aos níveis inferiores.

Tabela 5.1 - Valores de vazão obtidos nos pontos de descarga dos dutos.

Local da medição	Diâmetro do duto (mm)	Área do duto na descarga (m ²)	Velocidade média do fluxo de ar (m/s)	Vazão do ar na descarga (m ³ /s)
Escritório da mina	700	0,07	24,8	1,74
Galeria 111	1000	0,22	12,1	2,66
Chaminé N-110/N-135	1000	0,52	21,8	11,34
Central de concreto	700	0,08	13,3	1,06
Galeria 121	700	0,08	6,7	0,54
Galeria 122	700	0,07	6,6	0,46
P.A. da Rampa N-125	700	0,07	7,4	0,52
Galeria 142	700	0,08	9,6	0,77
Galeria 141	1000	0,16	9,1	1,46
P.A. da Rampa N-145	1000	0,05	10,7	0,54
P.A. da Rampa N-160	1000	0,15	14,9	2,24

5.4.2 Representação Gráfica do Circuito

Um desenho esquemático da rede de ventilação, onde são representados ramos, junções e malhas fechadas; bem como a localização dos ventiladores e outros elementos que compõem o sistema, torna-se necessário para a elaboração do arquivo "branch.dat" (arquivo de dados dos ramos). A Figura 5.5 é um desenho esquemático do circuito de ventilação da mina Medrado, no qual os segmentos contínuos representam a corrente de ventilação nos dutos, chamada corrente de entrada, enquanto que os segmentos tracejados representam a corrente nas diversas aberturas (rampas, travessas, galerias, chaminés, etc.) da mina, chamada corrente de retorno.

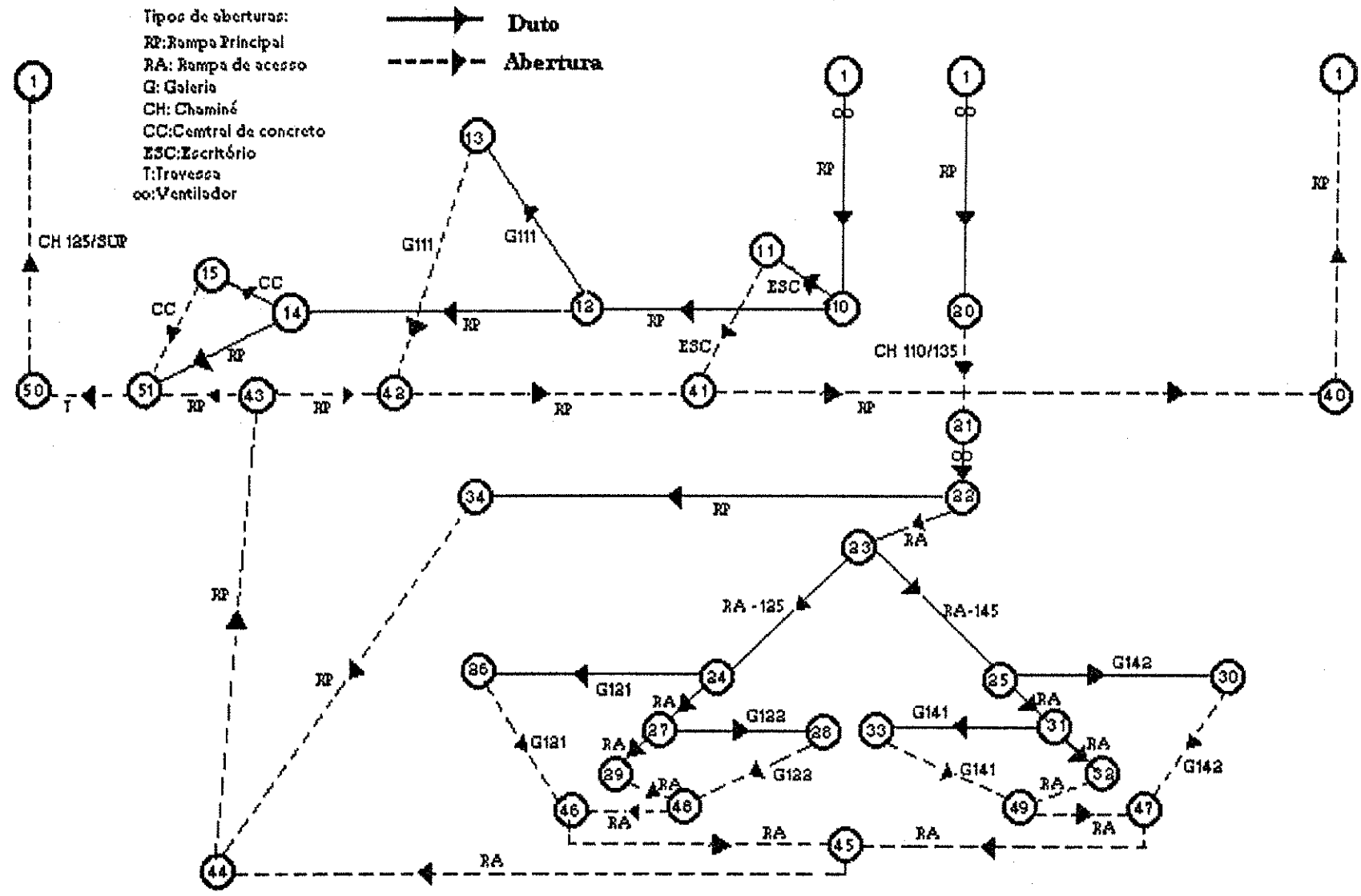


Figura 5.5 – Desenho esquemático do circuito de ventilação da mina Medrado.

5.4.3 Resistências dos Ramos

Para a determinação das resistências dos diversos ramos que compõem o circuito, foram calculadas inicialmente as resistências unitárias (resistência p / metro linear), correspondentes a cada tipo de ramo, através da relação $R = \frac{KLC}{A^3}$ (com L igual a 1 metro).

Para cada tipo de ramo, o valor do fator de fricção K foi obtido através de tabela (Hartman, 1982, p.151), enquanto que para o cálculo dos perímetros C e áreas das seções transversais A foram utilizados os valores médios das dimensões de cada abertura.

5.4.4 Comprimentos dos Ramos

Na determinação do comprimento total de cada ramo do circuito, levou-se em consideração, além da extensão linear do ramo (L), os comprimentos de ramo retilíneo equivalentes (L_e), que substituem os fatores causadores das perdas de pressão por choque naquele ramo (seção 2.3.4).

Os comprimentos equivalentes, correspondentes às fontes de perda de pressão por choque em um determinado ramo, foram obtidos através de tabela (Hartman, 1982, p.157). O produto do comprimento total ($L+L_e$) de cada ramo pela resistência unitária, correspondente ao tipo do referido ramo, fornece a resistência que o mesmo oferece à corrente de ventilação.

5.4.5 Os Dados de Entrada e a Execução do Programa

A solução do circuito de ventilação pelo programa desenvolvido pela MAPAO exige a geração de arquivos de dados com informações acerca de alguns parâmetros

de execução e de definição dos ramos e ventiladores que compõem o circuito, além de mudanças em circuitos já estudados. O programa permite ainda, a aplicação de um tratamento termodinâmico ao circuito estudado, que calcula e inclui em cada malha estabelecida pelo programa, a pressão de ventilação natural porventura existente nestas malhas (Seções 4.6 a 4.10).

O arquivo que contém os parâmetros de execução e as informações dos ramos do circuito a ser resolvido pode ser gerado a partir do programa independente "VENTDATA", enquanto que o arquivo com informações das curvas características dos ventiladores do circuito, pode ser gerado com auxílio do programa independente "FANSDATA". Estes dois arquivos ("branch.dat" e "fans.dat") são imprescindíveis para a obtenção de solução para o circuito estudado.

O Anexo 3 contém os dados necessários para a geração dos arquivos "branch.dat" e "fans.dat", utilizados na análise do circuito da mina Medrado, bem como os respectivos arquivos gerados, e lidos pelo programa, na referida análise. A resistência calculada para o ramo 20-21 (produto do comprimento total do ramo pela resistência unitária correspondente), foi multiplicada por um fator 10, em virtude deste ramo (chaminé de ligação entre os níveis 110 e 135) apresentar duas portas de ventilação, que o torna um ramo de alta resistência (Seção 4.4).

Alterações no circuito corrente, ocorridas em função de necessidades operacionais ou mesmo para um estudo de novas situações, não implicarão necessariamente, na geração de novo arquivo com dados do circuito para uma nova análise, pois o arquivo "changes.dat" (Seção 4.9), com informações sobre mudanças no circuito, poderá ser lido pelo programa através do código de controle 3 (Seção 4.5).

Não foi possível aplicar um tratamento termodinâmico ao circuito, através do arquivo "vtemp.dat" (Seção 4.10), por não se dispor, no período das medições, de um psicrômetro, que permitisse estabelecer as temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido de cada um dos nós da rede em estudo.

A execução do programa é iniciada com a leitura do arquivo que contém os dados do circuito juntamente com os parâmetros de execução ("branch.dat") através do código de controle 1. Em seguida são lidos os dados das curvas características dos

ventiladores do circuito de ventiladores ("fans.dat") através do código 4. Com a leitura destes dois arquivos, o circuito será resolvido através do código 2, sendo gerado um arquivo de saída de dados ("output.lis"), com os resultados do circuito. A Seção 4.5, mostra o menu completo das possíveis opções desejadas pelo usuário, o qual poderá ser acionado a qualquer momento da execução, através do código de controle 0.

5.4.6 Os Dados de Saída e a Análise Dos Resultados

O Anexo 3 contém o arquivo de saída com a solução do circuito em operação na mina Medrado, de acordo com os dados dos ramos e ventiladores, fornecidos através dos arquivos "branch.dat" e "fans.dat".

Por não ter sido comandado o código de controle 8, antes dos códigos de leitura dos arquivos de dados de entrada (Seção 4.5), este arquivo de saída contém a listagem destes dados.

A Seção 4.11 detalha os dados obtidos com a solução do circuito através do código de controle 2. É aconselhável, portanto, reportar àquela seção, durante a análise do arquivo de resultados.

Com o objetivo de demonstrar a eficiência do programa objeto do presente estudo, faremos a seguir algumas considerações sobre as vazões obtidas através das medições efetuadas em alguns pontos de descarga dos dutos, conforme Tabela 5.1 (Seção 5.2.2), e as vazões nos respectivos ramos, resultantes da solução do circuito pelo programa. Para relacionar o duto, no qual se efetuou a medição da vazão, com o ramo que ele representa no circuito, deve-se recorrer à representação esquemática da Figura 5.5.

5.4.7 Comparação entre as Vazões Medidas e as Calculadas pelo Programa

A maioria das vazões medidas nas saídas dos dutos nos diversos pontos de descarga apresenta acentuadas discrepâncias das vazões dos ramos correspondentes, resultantes da solução do circuito pelo programa computacional utilizado. A Tabela 5.2 relaciona estas vazões, podendo-se observar percentuais de erro acima de 200%. Estas discrepâncias são devidas a vazamentos nos dutos através de rasgos, e outros fatores não considerados nesta etapa de medições. A Seção 5.6 trata deste tema em forma mais abrangente.

Tabela 5.2 - Valores de vazão medidos nos pontos de descarga dos dutos e calculados pelo programa da MAPAO.

Local analisado	Vazão medida (m ³ /s)	Vazão calculada com uso do programa (m ³ /s)	Desvio entre valor calculado/valor medido (%)
Escritório da mina (ramo 10-11)	1,74	6,74	287,4
Galeria 111 (ramo 12-13)	2,66	2,82	6,0
Chaminé 110/135 (ramo 1-20)	11,34	12,63	11,4
Central de concreto (ramo 14-15)	1,06	1,34	26,4
Galeria 121 (ramo 24-26)	0,54	0,87	61,1
Galeria 122 (ramo 27-28)	0,46	0,36	-21,7
PA da rampa N-125 (ramo 27-29)	0,52	0,52	0,0
Galeria 142 (ramo 25-30)	0,77	1,34	42,5
Galeria 141 (ramo 31-33)	1,46	0,84	-42,5
PA da rampa N-145 (ramo 31-32)	0,54	1,75	224,1
PA da rampa N-160 (ramo 22-34)	2,24	6,95	210,3

5.5 ANÁLISE DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO ATUAL

Esta seção trata dos aspectos relativos às medições realizadas na mina Medrado em março de 1998, e da utilização do programa VentSim para se encontrar a distribuição do fluxo de ar nos diversos setores da mina no atual sistema de ventilação (aspirante), além de tratar da comparação entre os resultados medidos e os calculados pelo programa.

5.5.1 Resultados das Medições

As medições efetuadas seguiram a mesma metodologia utilizada anteriormente. Tomou-se o cuidado de se medirem vazões em alguns rasgos existentes nos dutos, que pelas suas dimensões afetariam os valores encontrados através das medições e do cálculo do programa. Além das medições efetuadas nos pontos de descarga dos dutos, foram realizadas medições em três pontos da corrente de ventilação, sendo dois na rampa principal (RP) e um na entrada da chaminé de exaustão. A Tabela 5.3 apresenta os valores de vazão obtidos através dessas medições. Os pontos de rasgos medidos são referidos aos locais onde os mesmos se encontram, com a finalidade de se obter a vazão total em cada setor.

Tabela 5.3 – Valores de vazão obtidos nos pontos de medição

Local da Medição	Área seccional no local medido (m ²)	Velocidade média do fluxo de ar (m/s)	Vazão do ar (m ³ /s)	Vazão total no setor (m ³ /s)
Duto da galeria 141	0,20	19,20	3,84	10,0
Rasgo em duto na rampa N-145	0,06	17,00	1,02	
Duto da galeria 141-D	0,50	9,50	4,75	
Rasgo no duto da galeria 141-D	0,03	14,00	0,42	
Duto da galeria 161	0,20	17,30	3,46	11,2
Duto da rampa N-160	0,28	26,60	7,45	
Rasgo no duto da rampa N-160	0,01	27,50	0,28	
RP após junção das entradas	23,18	1,920	44,51	44,5
RP após entrada N-90	23,13	2,36	54,59	54,6
Entrada da chaminé de exaustão	15,22	3,69	56,16	56,2

5.5.2 Representação Gráfica de Circuito

A representação gráfica do circuito é gerada pelo programa VentSim, a partir dos dados de entrada (coordenadas x, y e z dos nós), conforme abordado no capítulo anterior (Seção 4.2.3 e Figura 4.6)

5.5.3 Dados de Entrada do Programa VentSim

Os elementos necessários para a obtenção da distribuição do fluxo e pressões de ar na rede, tais como comprimentos e resistências dos ramos, são calculados automaticamente pelo programa a partir das coordenadas e outras características dos mesmos definidas na fase de entrada de dados.

5.5.4 Dados de Saída do Programa VentSim

Diferentemente do programa da MAPAO onde resultados são apresentados em forma de tabelas, no programa VentSim os dados são apresentados em forma gráfica juntamente com a rede. A Tabela 5.4 mostra as vazões calculadas pelo programa VentSim em locais adequados à comparação com os valores obtidos pelas medições *in loco*

Tabela 5.4 – Vazões obtidas pelo programa VentSim.

Local analisado	Vazão calculada (m ³ /s)	Vazão total no setor (m ³ /s)
Duto da galeria 141	6,5	12,3
Duto da galeria 141-D	5,8	
Duto da galeria 161	5,4	12,5
Duto da rampa N-160	7,1	
RP após junção das duas entradas	53,1	53,1
RP após entrada N-90	63,8	63,8
Entrada da chaminé de exaustão	63,8	63,8

5.5.5 Comparação entre as Vazões Medidas e as Calculadas pelo Programa

Conforme pode-se observar das Tabelas 5.3 e 5.4, os dados obtidos experimentalmente aproximam-se dos calculados pelo programa VentSim. Observa-se que os valores de vazão da Tabela 5.3 em alguns pontos de descarga dos dutos

apresentam acentuada discrepância com relação aos fornecidos pelo programa. Para uma melhor observação, os valores de vazão desta tabela deverão ser somados por setor para se obter a vazão total em cada setor. Assim, a vazão total no nível 145, por exemplo, seria $10,0 \text{ m}^3/\text{s}$. Da mesma forma a vazão total no nível 160 é de $11,2 \text{ m}^3/\text{s}$, o que se aproxima bastante dos valores calculados para cada um desses setores.

A Tabela 5.5 compara as vazões totais, por setor, medidas e calculadas.

Tabela 5.5 – Comparação entre as vazões totais medidas e calculadas.

Setor	Vazão medida (m^3/s)	Vazão calculada (m^3/s)	Desvio entre valor calculado/valor medido (%)
Nível 145	10,0	12,3	23,0
Nível 160	11,2	12,5	11,6
RP após junção das entradas	44,5	53,1	19,3
RP após entrada N-90	54,6	63,8	16,8
Entrada da chaminé de exaustão	56,2	63,8	13,5

5.6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As distorções encontradas entre os valores medidos e calculados pelo programa, para o caso de dutos, devem-se principalmente aos seguintes fatores:

1. Rasgos existentes nos dutos de ventilação, por onde, dependendo da sua dimensão, pode ocorrer o vazamento de maior ou menor parcela da vazão do ar naquele ramo. Um exemplo deste fato, visto na Seção 5.4 são os valores encontrados para o escritório da mina, onde foi observado que o duto que leva a corrente de ar àquele local apresentava um grande rasgo no momento da medição da vazão na boca do duto. Nas medições efetuadas posteriormente para a rede de ventilação atual foram feitas medições de velocidades em alguns rasgos, com vazões atingindo até 25% do valor na boca do duto.
2. Estrangulamentos nas bocas dos dutos, que apesar de exercerem forte influência nas resistências dos ramos, não foram incluídos na determinação das referidas resistências, as quais foram calculadas, nos casos de dutos, em função apenas dos comprimentos e diâmetros dos mesmos. Com

relação a este fator de distorção, pode-se observar na Tabela 5.2 uma discrepância entre os valores das vazões nas galerias 141 e 142, como também entre os valores de vazão obtidos para o ponto de apoio (PA) do nível 145. Na análise desta situação, verificou-se que o forte estrangulamento existente na saída do duto naquele ponto de apoio ocasionava, em termos práticos, uma resistência bem maior daquele ramo, em relação à fornecida, no arquivo de dados dos ramos, para a solução do circuito pelo programa. Esta resistência usada pelo programa considerou apenas o pequeno comprimento e o diâmetro do duto (1000 mm) naquele ramo, o que a tornou bem menor do que a real. Como a resistência num dado ramo exerce influência no comportamento da distribuição do ar em toda a malha a que pertence, e não somente na dele próprio, tem-se uma vazão bem maior no ramo imediatamente anterior (galeria 141).

Com relação aos rasgos apresentados pelos dutos de ventilação, deve-se exercer uma vigilância constante para detectá-los e promover a eliminação dos mesmos, através de concertos ou substituição das partes afetadas, para que o fornecimento de ar previsto para as diversas frentes não seja prejudicado.

Para o caso de estrangulamentos dos dutos, aconselha-se que se façam tantas simulações quanto necessário, atribuindo-se diversos valores de resistência aos ramos correspondentes àqueles dutos, para que, comparando-se com os resultados práticos, se possa determinar um fator de acréscimo das resistências calculadas (sem considerar o estrangulamento), em função da proporcionalidade do estrangulamento com relação ao diâmetro do duto. Na realidade, os dutos estrangulados deveriam ser tratados como ramos do tipo 2 (ramo com regulador), mas esse procedimento pode tornar inviável a solução do circuito pelo programa, em virtude das restrições decorrentes da aplicação da 2ª Lei de Kirchhoff (Seção 3.2).

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Como conclusões deste trabalho pode-se destacar as seguintes:

- Basicamente a pesquisa envolveu: definição de parâmetros do circuito de ventilação, medições de vazão, modelamento numérico, e comparação entre os valores medidos e calculados, para os sistemas soprante e aspirante.
- Observou-se que as vazões medidas na saída dos dutos apresentaram valores bastante inferiores aos calculados, sendo este fato atribuído a vazamentos ao longo dos dutos através de rasgos e conexões, principalmente nos casos em que os dutos apresentam estrangulamento excessivo na saída.
- Para as vazões de ar por setores observou-se que os valores calculados e medidos apresentam diferenças inferiores a 25%, sendo este erro considerado aceitável para esta aplicação, tendo em vista dificuldades na determinação precisa dos parâmetros do sistema de ventilação.
- Ficou patenteada a importância da validação de programas de computadores, através de medições *in loco*, antes da utilização destes programas para projetos de modificação de sistemas de ventilação.

- Observou-se uma melhoria nas condições de ventilação da mina Medrado com a adoção do sistema aspirante, principalmente na rampa de acesso, que passou a ser suprida com ar fresco.
- Ficou demonstrada a versatilidade e facilidade de uso dos programas de ventilação de minas atualmente disponíveis.

Algumas recomendações para a obtenção de melhores resultados na análise, e por conseguinte, na qualidade do sistema de ventilação analisado são:

- Determinação mais precisa dos fatores de rugosidade das paredes das escavações e das curvas características dos ventiladores,
- Maior número de medições de vazão, e medições de pressões para verificação mais apurada da validade do modelamento numérico.
- Determinação mais precisa de vazamentos nos dutos através de medições de vazão na saída dos mesmos, e das vazões de ar nas galerias.
- Utilização do software de ventilação para o projeto de modificações do sistema de ventilação da mina, no sentido de otimizar o mesmo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

HARTMAN, H. L. **Mine Ventilation and Air Conditioning**. John Wiley, New York, 1981

MCPHERSON, M. J., "Ventilation Network Analysis", Ch. 16. *In: The Ventilation of South Africa Gold Mines*. The Mine Ventilation Society of South Africa, 1974.

MINES ACCIDENT PREVENTION ASSOCIATION OF ONTARIO – MAPAO. **User 's Guide for Mine Ventilation Network Progrwn**, Version 2.0 1989.

STEWART, C., "VentSim Version 2.8 - Mine Ventilation Simulation Software", Ausminco Ventilation, Perth-Austrália, 1998.

VUTUKURI, V. S. and Lama, R. D., **Environmental Engineering in Mines**, Cambridge University Press, 1986,

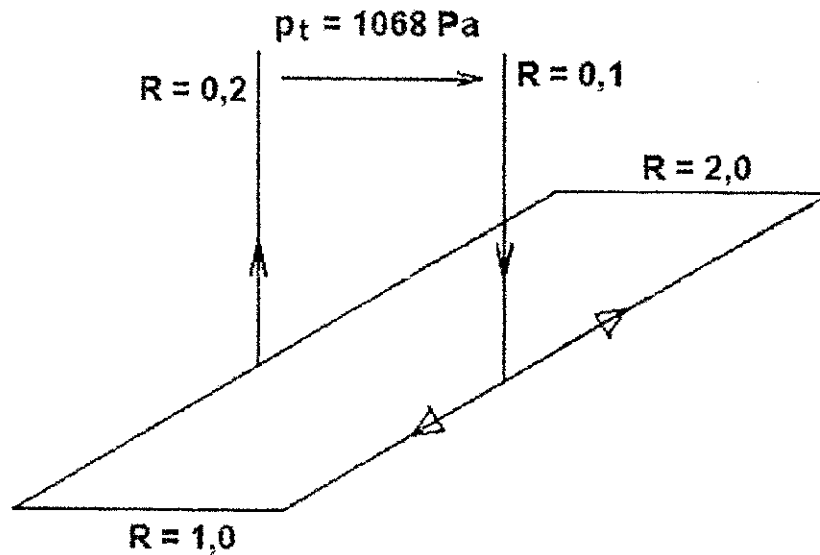
YANES, E., **Ventilation des Minas**, Departamento de Minas, Universidad de Chile, Santiago, 1977,

ANEXO 1

EXEMPLOS PRÁTICOS DOS PRINCIPAIS MÉTODOS DE ANÁLISE DE REDES DE VENTILAÇÃO DE MINAS

EXEMPLO I - Aplicação do Método das Resistências Equivalentes na Análise de um Pequeno Trecho de Mina (McPherson, 1974, pp.349-350).

Parte de uma mina pode ser resolvida em dois ramos conectados em paralelo através das bases de dois shafts. Dada a informação mostrada na figura abaixo, calcular o fluxo de ar e a queda de pressão por fricção para cada galeria.



Solução:

A resistência equivalente R_p para os dois ramos paralelos, é dada pela aplicação da equação 3.6:

$$\frac{1}{\sqrt{R_p}} = \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{1}} = 0,7072 + 1$$

$$R_p = \frac{1}{(1,7072)^2} = 0,3431 \frac{Ns^2}{m^8}$$

Esta resistência equivalente é conectada em série com os dois shafts. Conseqüentemente, a resistência equivalente para o circuito completo, R_t , é dada pela aplicação da equação 3.5:

$$R_t = 0,1 + 0,3431 + 0,2 = 0,6431 \frac{Ns^2}{m^8}$$

Uma grande vantagem de galerias conectadas em paralelo é aqui mostrada. Até mesmo incluindo os shafts, a resistência total é menor que ambos os ramos paralelos considerados individualmente.

A taxa de volume de ar total nos shafts, Q_t , é dada pela Lei Quadrática (Equação 2.14):

$$Q_t = \sqrt{\frac{p_t}{R_t}} = \sqrt{\frac{1608}{0,6431}} = 50 \frac{m^3}{s}$$

A queda de pressão por fricção em cada shaft é obtida também pela mesma equação. Usando os valores de resistência como subscritos identificadores, tem-se:

$$p_{0,1} = 0,1 \cdot (50)^2 = 250 Pa$$

$$p_{0,2} = 0,2 \cdot (50)^2 = 500 Pa$$

Desta forma, a combinação da queda de pressão friccional nos shafts é $750 P_a$.

A queda de pressão friccional através de cada ramo paralelo é então dada como:

$$p_1 = p_2 = 1608 - 750 = 858 Pa$$

Aplicando a Lei Quadrática para o ramo de $1 Ns^2/m^8$ tem-se:

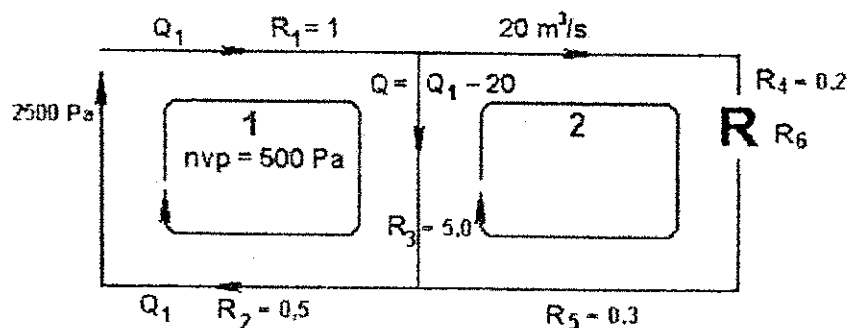
$$Q_1 = \sqrt{\frac{p_1}{R_1}} = \sqrt{\frac{858}{1}} = 29,29 \frac{m^3}{s}$$

e, portanto,

$$Q_2 = 50 - 29,29 = 20,71 \frac{m^3}{s}$$

EXEMPLO II - Aplicação do Método da Análise Direta para uma Pequena Rede de Ventilação (McPherson, 1974, pp.351-352).

Uma rede de duas malhas é mostrada em diagrama na figura abaixo. Uma pressão diferencial de 2500 Pa é aplicada através do circuito, e uma pressão de ventilação natural de 500 Pa atua na direção do fluxo de ar dentro da malha 1. Um Regulador, R_6 , está construído no ramo mais à direita para limitar a vazão do fluxo naquele ramo em $20 \text{ m}^3/\text{s}$. Dadas as resistências de todas as galerias, encontre a distribuição do fluxo de ar e a resistência do Regulador.



Solução:

Se a vazão total do fluxo de ar que entra no circuito é Q_1 e $20 \text{ m}^3/\text{s}$ é o fluxo através do ramo regulado, então o fluxo através do ramo central é $Q_1 - 20 \text{ m}^3/\text{s}$. Assim a 1ª Lei de Kirchhoff é satisfeita pelos fluxos mostrados na figura.

A escolha das malhas é completamente arbitrária contanto que o menor número ($b-j+1$) seja satisfeito e que todos os ramos sejam incluídos. Uma terceira malha ($R_1-R_4-R_6-R_5-R_2$) poderia igualmente ter sido escolhida. Similarmente a escolha do sentido positivo em torno de cada malha é arbitrária, desde que a direção escolhida para cada malha seja seguida em toda a análise. Aplicando a 2ª Lei de Kirchhoff para cada uma das duas malhas escolhidas, as seguintes equações podem ser construídas:

Malha 1:

$$R_1 Q_1^2 + R_3 (Q_1 - 20)^2 + R_2 Q_1^2 - p_v - (mvp) = 0$$

$$1Q_1^2 + 5(Q_1 - 20)^2 + 0,5Q_1^2 - 2500 - 500 = 0$$

$$6,5Q_1^2 - 200Q_1 - 1000 = 0$$

Isto é uma equação do 2º grau que pode ser resolvida para dar:

$$Q_1 = 35,147 \frac{m^3}{s}$$

Resultando, então, no fluxo através do ramo 3 (R_3) de:

$$Q_3 = 15,147 \frac{m^3}{s}$$

Malha 2:

$$R_4 20^2 + R_6 20^2 + R_5 20^2 - R_3 (Q_1 - 20)^2 = 0$$

Deve-se notar a troca de sinal para o ramo R_3 , devida à direção da malha ser oposta ao fluxo do ramo.

Substituindo as resistências:

$$(0,2 + 0,3) 400 + 400R_6 - 5(15,147)^2 = 0$$

Resultando em:

$$R_6 = 2,368 \frac{Ns^2}{m^8}$$

Se o fluxo específico de $20 \text{ m}^3/\text{s}$ tornar necessário o uso de um ventilador auxiliar em vez de um regulador no ramo da direita, então um procedimento similar deve ser usado para determinar a pressão requerida do ventilador auxiliar.

EXEMPLO III - Aplicação Manual do Método de Hardy-Cross na Análise de uma Rede Simples de Ventilação (McPherson, 1974, pp.357-361).

Dado o circuito de ventilação mostrado na figura 1, determine a distribuição do fluxo de ar no mesmo. Suponha que a pressão do ventilador permanece constante a 2000 Pa e que não há ventilação natural.

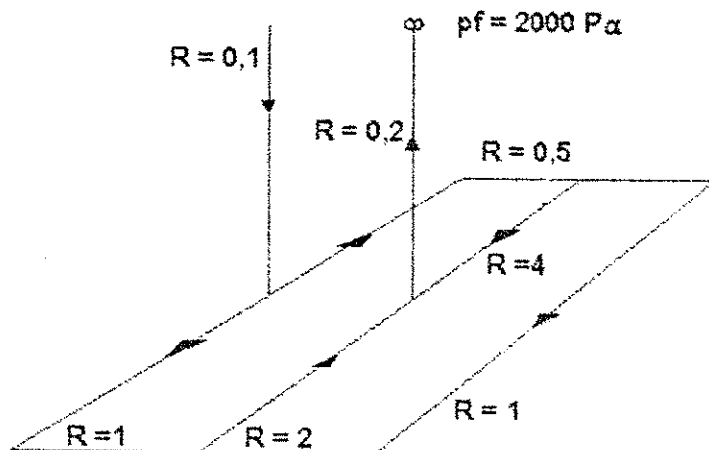


Figura 1

Solução:

A rede é redesenhada de forma diagramática, conforme a figura 2, podendo-se observar que existem seis ramos e quatro junções que fornecerão o número mínimo de 3 malhas onde serão calculados os fatores de correção de malha ΔQ_m , pois:

$$b - j + 1 = 6 - 4 + 1 = 3$$

A rede não pode ser resolvida facilmente por análise direta, nem pode ser resolvida por resistências equivalentes em série e paralelo. Será portanto resolvida pelo método de Hardy- Cross, fazendo-se iterações até todos os fatores de correção de malha ficarem abaixo de $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

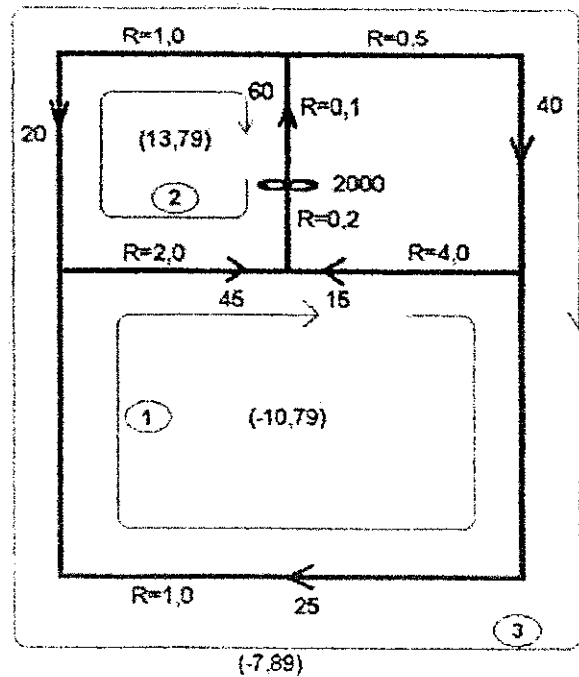


Figura 2

As três malhas são fechadas tal que a maior resistência ($4 \text{ Ns}^2/\text{m}^8$) aparece em uma malha somente. As vazões de ar estimadas são dadas também na figura 2. Os fatores de correção de malha ΔQ_m são calculados da equação 3.12, com $S_i = 0$, porque a pressão do ventilador é constante. A pressão de ventilação natural é também igual a zero, pois não há energia de ventilação natural.

1ª Iteração :

Malha1

$$\Delta Q_1 = \frac{-(1 \times 25^2 + 2 \times 45^2 - 4 \times 15^2)}{2(1 \times 25 + 2 \times 45 + 4 \times 15)} = -10,79 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Malha 2

$$\Delta Q_2 = \frac{-(-0,2 \times 60^2 - 2 \times 45^2 - 1 \times 20^2 - 0,1 \times 60^2 + 2000)}{2(0,2 \times 60 + 2 \times 45 + 1 \times 20 + 0,1 \times 60)} = +13,79 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Malha 3

$$\Delta Q_3 = \frac{-(1 \times 25^2 - 1 \times 20^2 + 0,5 \times 40^2)}{2(1 \times 25 + 1 \times 20 + 0,5 \times 40)} = -7,89 \frac{m^3}{s}$$

Aplicando estes fatores de correção de malha para as quantidades de ar estimadas, temos o modelo de fluxo mostrado na figura 3. O processo é então repetido usando as vazões resultantes desta primeira correção.

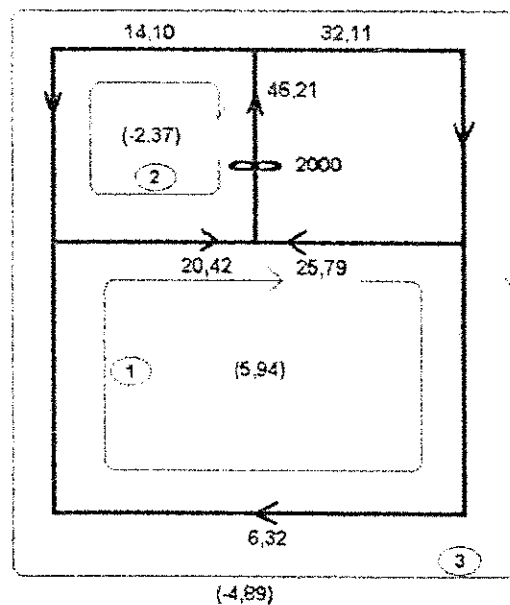


Figura 3

2ª Iteração :

Malha 1

$$\Delta Q_1 = \frac{-(1 \times 6,32^2 + 2 \times 20,42^2 - 4 \times 25,79^2)}{2(1 \times 6,32 + 2 \times 20,42 + 4 \times 25,79)} = +5,94 \frac{m^3}{s}$$

Malha 2

$$\Delta Q_2 = \frac{-(-0,3 \times 46,21^2 - 2 \times 20,42^2 - 1 \times 14,10^2 + 2000)}{2(0,3 \times 46,21 + 2 \times 20,42 + 1 \times 14,10)} = -2,37 \frac{m^3}{s}$$

Malha 3

$$\Delta Q_3 = \frac{-(1 \times 6,32^2 - 1 \times 14,10^2 + 0,5 \times 32,11^2)}{2(1 \times 6,32 + 1 \times 14,10 + 0,5 \times 32,11)} = -4,89 \frac{m^3}{s}$$

Os fatores de correção de malha são novamente aplicados para as vazões mostradas na figura 3 e um terceiro modelo de fluxo é definido.

O processo completo é repetido sucessivamente até que todos os valores ΔQ fiquem abaixo da precisão especificada de $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Neste exemplo, oito iterações serão necessárias para se encontrar a exatidão requerida. Os fatores de correção de malha correspondentes às oito iterações são listados abaixo, resultando no modelo de fluxo final mostrado na figura 4.

Iteração	ΔQ_1	ΔQ_2	ΔQ_3
1	-10,79	+13,79	-7,89
2	+5,94	-2,37	-4,89
3	-0,45	+4,36	+0,37
4	+1,65	+0,05	-2,08
5	+0,16	+1,42	-0,32
6	+0,56	+0,21	-0,73
7	+0,13	+0,51	-0,20
8	+0,20	+0,13	-0,41

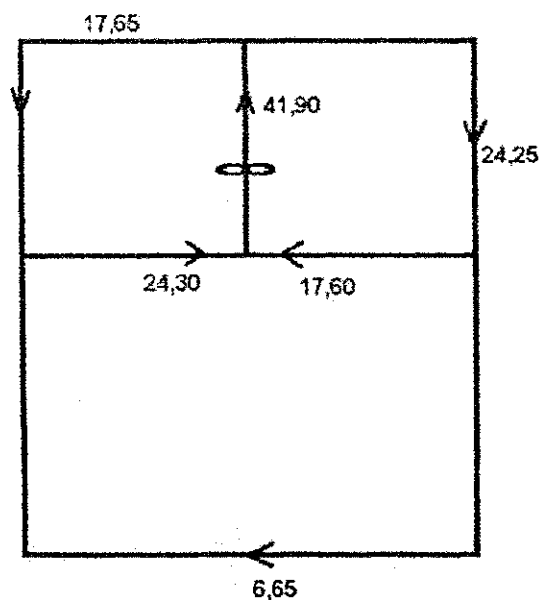


Figura 4

ANEXO 2

Formatos e campos especificados para os arquivos de dados de entrada do programa da MAPAO

Conteúdo e Formato do Arquivo de Parâmetros de Execução e Dados dos Ramos
(BRANCH.DAT)

<u>Descrição dos Registros e Dados</u>	<u>Formato</u>	<u>Colunas</u>
Primeiro registro: Parâmetros de execução		
- Nº máximo de iterações	I10	1-10
- Precisão requerida	F10.5	11-20
- Fator de correção para unidade de potência (HP ou KW)	F10.5	21-30
Registros subsequentes: Dados dos ramos		
- Nó inicial do ramo	I5	1-5
- Nó final do ramo	I5	6-10
- Tipo do ramo	I10	11-20
- Resistência do ramo	F10.4	21-30
- Fluxo estimado para o ramo	F10.4	31-40
- Informação adicional sobre o ramo	F10.4	41-50
- Pressão de ventilação natural no ramo	F10.4	51-60
Último registro: Final de arquivo		
- Branco ou zero		

Conteúdo e Formato do Arquivo de Dados das Curvas Características dos Ventiladores
(FANS.DAT)

<u>Descrição dos Registros e Dados</u>	<u>Formato</u>	<u>Colunas</u>
Primeiro registro: Valores de fluxo		
- Número da curva característica	F9.0	2-10
- 2 a 7 valores de fluxo em ordem crescente	F10.4	11-20
	F10.4	21-30
	:	:
	etc.	etc.
Segundo registro: Valores de pressão		
- 2 a 7 valores de pressão em ordem decrescente	F10.4	11-20
	F10.4	21-30
	:	:
	etc.	etc.
Terceiro registro: Valores de eficiência		
- 2 a 7 valores de eficiência do ventilador	F10.4	11-20
	F10.4	21-30
	:	:
	etc.	etc.
Registros subsequentes: Semelhantes aos acima		
- Cada ventilador terá uma série de três registros semelhantes aos expostos acima.		
Último registro: Final de arquivo		
- Branco ou zero		

Conteúdo e Formato do Arquivo de Dados de Alterações a Serem Efetuadas no Circuito (CHANGES.DAT)

<u>Descrição dos Registros e Dados</u>	<u>Formato</u>	<u>Colunas</u>
Para cada registro: Dados dos parâmetros a serem alterados, adicionados ou eliminados		
- Tipo de alteração	I1	1
- Nó inicial do ramo	I4	2-5
- Nó final do ramo	I5	6-10
- Tipo do ramo	I10	11-20
- Resistência do ramo	F10.4	21-30
- Fluxo estimado para o ramo	F10.4	31-40
- Informação adicional sobre o ramo	F10.4	41-50
- Pressão de ventilação natural no ramo	F10.4	51-60

Obs.: 1) Alterações do tipo 3 (eliminação do ramo) requerem apenas os 3 primeiros parâmetros do registro.

2) Grupos de mudanças podem ser separados por um registro em branco. Após a solução para um grupo de alterações (através do código de controle 2), um subsequente código de controle 3 fará com que seja feita uma leitura do próximo conjunto de registros de alterações, e assim por diante. Um branco ou zero na coluna 1 finaliza o arquivo de alterações do circuito.

Conteúdo e Formato do Arquivo de Dados para o Cálculo de Pressão de Ventilação Natural
(VTEMP.DAT)

<u>Descrição dos Registros e Dados</u>	<u>Formato</u>	<u>Colunas</u>
Primeiro registro: Dados do ponto de referência		
- Elevação do ponto	F10.4	1-10
- Pressão barométrica no ponto	F10.4	11-20
- Temperatura de bulbo seco no ponto	F10.4	21-30
- Temperatura de bulbo úmido no ponto	F10.4	31-40
Registros subsequentes: Dados dos nós		
- Número do nó	I5	1-5
- Elevação do nó	F10.4	6-15
- Temperatura de bulbo seco no nó	F10.4	16-25
- Temperatura de bulbo úmido no nó	F10.4	26-35
Último registro: Final de arquivo		
- Branco ou zero		

ANEXO 3

Dados necessários para geração dos arquivos “branch.dat” e “fans.dat” utilizados na análise do circuito da mina Medrado e respectivos arquivos gerados; arquivo de saída dos resultados com a solução do circuito

DADOS PARA A GERAÇÃO DO ARQUIVO "BRANCH.DAT"

Parâmetros de Execução:

Nº de iterações: 30
 Precisão requerida: 0,05
 Fator de conversão: 0,001

Dados dos Ramos:

<u>Nó Inicial</u>	<u>Nó Final</u>	<u>Tipo do Ramo</u>	<u>Resistência</u>	<u>Fluxo Estimado</u>	<u>Dado Adicional</u>
1	10	3	5,22536	15	1
1	20	3	6,06142	15	1
10	11	1	7,10638	5	
10	12	1	2,68733	10	
12	13	1	21,31913	5	
12	14	1	7,04677	5	
14	15	1	7,10638	2	
14	51	1	1,13465	3	
15	51	1	0,00282	2	
13	42	1	0,01492	5	
11	41	1	0,00310	5	
20	21	1	21,36100	15	
21	22	3	2,23944	15	2
22	34	1	4,77747	7	
22	23	1	4,18029	8	
23	24	1	27,71487	3	
23	25	1	5,07606	5	
24	26	1	15,10105	1	
24	27	1	13,32446	2	
27	28	1	9,77127	0,5	
27	29	1	4,97446	1,5	
25	30	1	9,77127	2	
25	31	1	2,23944	3	
31	33	1	3,61296	1	
31	32	1	0,83606	2	
29	48	1	0,00129	1,5	
28	48	1	0,00591	0,5	
48	46	1	0,00129	2	
26	46	1	0,01000	1	
32	49	1	0,00129	2	
33	49	1	0,01521	1	
49	47	1	0,00129	3	
30	47	1	0,00563	2	
47	45	1	0,00514	5	
46	45	1	0,00488	3	
45	44	1	0,00154	8	
34	44	1	0,00802	7	
44	43	1	0,01033	15	
43	51	1	0,00129	10	
43	42	1	0,00956	5	
42	41	1	0,00206	10	
41	40	1	0,01542	15	
40	1	1	0,00401	15	
51	50	1	0,01971	15	
50	1	1	0,14528	15	

DADOS PARA A GERAÇÃO DO ARQUIVO "FANS.DAT"

Dados da Curva Característica do Ventilador nº1:

<u>Vazão (m³/s)</u>	<u>Pressão (Pa)</u>	<u>Eficiência (%)</u>
11,328	4147,612	64
12,272	3526,712	60
13,216	2707,124	50
14,160	1564,668	35
14,632	844,424	30

Dados da Curva Característica do Ventilador nº2:

<u>Vazão (m³/s)</u>	<u>Pressão (Pa)</u>	<u>Eficiência (%)</u>
11,800	1887,536	65
14,160	1490,536	60
16,520	869,260	50
17,936	397,376	40

	30	.05000	.001			
1	10	3	5.22536	15.00000	1.00000	.00000
1	20	3	6.06142	15.00000	1.00000	.00000
10	11	1	7.10638	5.00000	.00000	.00000
10	12	1	2.68733	10.00000	.00000	.00000
12	13	1	21.31913	5.00000	.00000	.00000
12	14	1	7.04677	5.00000	.00000	.00000
14	15	1	7.10638	2.00000	.00000	.00000
14	51	1	1.13465	3.00000	.00000	.00000
15	51	1	.00282	2.00000	.00000	.00000
13	42	1	.01492	5.00000	.00000	.00000
11	41	1	.00310	5.00000	.00000	.00000
20	21	1	21.36100	15.00000	.00000	.00000
21	22	3	2.23944	15.00000	2.00000	.00000
22	34	1	4.77747	7.00000	.00000	.00000
22	23	1	4.18029	8.00000	.00000	.00000
23	24	1	27.71487	3.00000	.00000	.00000
23	25	1	5.07606	5.00000	.00000	.00000
24	26	1	15.10105	1.00000	.00000	.00000
24	27	1	13.32446	2.00000	.00000	.00000
27	28	1	9.77127	.50000	.00000	.00000
27	29	1	4.97446	1.50000	.00000	.00000
25	30	1	9.77127	2.00000	.00000	.00000
25	31	1	2.23944	3.00000	.00000	.00000
31	33	1	3.61296	1.00000	.00000	.00000
31	32	1	.83606	2.00000	.00000	.00000
29	48	1	.00129	1.50000	.00000	.00000
28	48	1	.00591	.50000	.00000	.00000
48	46	1	.00129	2.00000	.00000	.00000
26	46	1	.01000	1.00000	.00000	.00000
32	49	1	.00129	2.00000	.00000	.00000
33	49	1	.01521	1.00000	.00000	.00000
49	47	1	.00129	3.00000	.00000	.00000
30	47	1	.00563	2.00000	.00000	.00000
47	45	1	.00514	5.00000	.00000	.00000
46	45	1	.00488	3.00000	.00000	.00000
45	44	1	.00154	8.00000	.00000	.00000
34	44	1	.00802	7.00000	.00000	.00000
44	43	1	.01033	15.00000	.00000	.00000
43	51	1	.00129	10.00000	.00000	.00000
43	42	1	.00956	5.00000	.00000	.00000
42	41	1	.00206	10.00000	.00000	.00000
41	40	1	.01542	15.00000	.00000	.00000
40	1	1	.00401	15.00000	.00000	.00000
51	50	1	.01971	15.00000	.00000	.00000
50	1	1	.14528	15.00000	.00000	.00000

1.00	11.328	12.272	13.216	14.160	14.632
	4147.612	3526.712	2707.124	1564.668	844.424
	64.000	60.000	50.000	35.000	30.000
2.00	11.800	14.160	16.520	17.936	
	1887.536	1490.160	869.260	397.376	
	65.000	60.000	50.000	40.000	

0

A NAI

1*****CONTROL CODE1*****

DATA READING

BRANCH #	IN.	FIN.	TYPE	RESISTANCE	FLOW	ADD.DATA	NAT.PRESS.
1	1	10	3	5.22536	15.000	1.000	.000
2	1	20	3	6.06142	15.000	1.000	.000
3	10	11	1	7.10638	5.000	.000	.000
4	10	12	1	2.68733	10.000	.000	.000
5	12	13	1	21.31913	5.000	.000	.000
6	12	14	1	7.04677	5.000	.000	.000
7	14	15	1	7.10638	2.000	.000	.000
8	14	51	1	1.13465	3.000	.000	.000
9	15	51	1	.00282	2.000	.000	.000
10	13	42	1	.01492	5.000	.000	.000
11	11	41	1	.00310	5.000	.000	.000
12	20	21	1	21.36100	15.000	.000	.000
13	21	22	3	2.23944	15.000	2.000	.000
14	22	34	1	4.77747	7.000	.000	.000
15	22	23	1	4.18029	8.000	.000	.000
16	23	24	1	27.71487	3.000	.000	.000
17	23	25	1	5.07606	5.000	.000	.000
18	24	26	1	15.10105	1.000	.000	.000
19	24	27	1	13.32446	2.000	.000	.000
20	27	28	1	9.77127	.500	.000	.000
21	27	29	1	4.97446	1.500	.000	.000
22	25	30	1	9.77127	2.000	.000	.000
23	25	31	1	2.23944	3.000	.000	.000
24	31	33	1	3.61296	1.000	.000	.000
25	31	32	1	.83606	2.000	.000	.000
26	29	48	1	.00129	1.500	.000	.000
27	28	48	1	.00591	.500	.000	.000
28	48	46	1	.00129	2.000	.000	.000

1*****CONTROL CODE # 4*****

FAN CHARACTERISTIC CURVES

CURVE #	1.	FLOW	PRESSURE	EFFICIENCY
		11.328	4147.612	64.00
		12.272	3526.712	60.00
		13.216	2707.124	50.00
		14.160	1564.668	35.00
		14.632	844.424	30.00
CURVE #	2.	FLOW	PRESSURE	EFFICIENCY
		11.800	1887.536	65.00
		14.160	1490.160	60.00
		16.520	869.260	50.00
		17.936	397.376	40.00

FAN CURVES IN :

- 1.
- 2.

1*****CONTROL CODE # 2*****

NUMBER OF ITERATIONS 6
 LAST SUM OF ERRORS .12656

RESULTS

BR. NO.	INI. NODE	FINAL NODE	BRANCH FLOW	AIR DENSITY	PRESS. RESIS.	PRESS. REG/FAN	RES. KW	PRESS. TOTAL	BRANCH TYPE	RES.	NVP.	ADD. DATA
1	1	10	14.273	1.200	-1064.435	1392.947	15.192	328.512	3	5.22536	.000	1.00
2	1	20	12.625	1.200	-966.138	3220.222	12.198	2254.084	3	6.06142	FAN 58.81 KW EFF	33.8
3	10	11	6.740	1.200	-322.799	.000	2.176	-322.799	1	7.10638	.000	.00
4	10	12	7.533	1.200	-152.488	.000	1.149	-152.488	1	2.68733	.000	.00
5	12	13	2.824	1.200	-170.012	.000	.480	-170.012	1	21.31913	.000	.00
6	12	14	4.709	1.200	-156.252	.000	.736	-156.252	1	7.04677	.000	.00
7	14	15	1.337	1.200	-12.694	.000	.017	-12.694	1	7.10638	.000	.00
8	14	51	3.372	1.200	-12.904	.000	.044	-12.904	1	1.13465	.000	.00
9	15	51	1.337	1.200	-.005	.000	.000	-.005	1	.00282	.000	.00
10	13	42	2.824	1.200	-.119	.000	.000	-.119	1	.01492	.000	.00
11	11	41	6.740	1.200	-.141	.000	.001	-.141	1	.00310	.000	.00
12	20	21	12.625	1.200	-3404.758	.000	42.985	-3404.758	1	21.36100	.000	.00
13	21	22	12.625	1.200	-356.947	1748.622	4.506	1391.675	3	2.23944	.000	2.00
14	22	34	6.946	1.200	-230.497	.000	1.601	-230.497	1	4.77747	FAN 34.90 KW EFF	63.3
15	22	23	5.679	1.200	-134.821	.000	.766	-134.821	1	4.18029	.000	.00
16	23	24	1.751	1.200	-84.995	.000	.149	-84.995	1	27.71487	.000	.00
17	23	25	3.928	1.200	-78.313	.000	.308	-78.313	1	5.07606	.000	.00
18	24	26	.873	1.200	-11.522	.000	.010	-11.522	1	15.10105	.000	.00
19	24	27	.878	1.200	-10.265	.000	.009	-10.265	1	13.32446	.000	.00
20	27	28	.360	1.200	-1.263	.000	.000	-1.263	1	9.77127	.000	.00
21	27	29	.518	1.200	-1.336	.000	.001	-1.336	1	4.97446	.000	.00
22	25	30	1.336	1.200	-17.435	.000	.023	-17.435	1	9.77127	.000	.00

BR. NO.	INI. NODE	FINAL NODE	BRANCH FLOW	AIR DENSITY	PRESS. RESIS.	PRESS. REG/FAN	RES. KW	PRESS. TOTAL	BRANCH TYPE	RES.	NVP.	ADD. DATA
23	25	31	2.592	1.200	-15.046	.000	.039	-15.046	1	2.23944	.000	.00
24	31	33	.841	1.200	-2.556	.000	.002	-2.556	1	3.61296	.000	.00
25	31	32	1.751	1.200	-2.563	.000	.004	-2.563	1	.83606	.000	.00
26	29	48	.518	1.200	.000	.000	.000	.000	1	.00129	.000	.00
27	28	48	.360	1.200	-.001	.000	.000	-.001	1	.00591	.000	.00
28	48	46	.878	1.200	-.001	.000	.000	-.001	1	.00129	.000	.00
29	26	46	.873	1.200	-.008	.000	.000	-.008	1	.01000	.000	.00
30	32	49	1.751	1.200	-.004	.000	.000	-.004	1	.00129	.000	.00
31	33	49	.841	1.200	-.011	.000	.000	-.011	1	.01521	.000	.00
32	49	47	2.592	1.200	-.009	.000	.000	-.009	1	.00129	.000	.00
33	30	47	1.336	1.200	-.010	.000	.000	-.010	1	.00563	.000	.00
34	47	45	3.928	1.200	-.079	.000	.000	-.079	1	.00514	.000	.00
35	46	45	1.751	1.200	-.015	.000	.000	-.015	1	.00488	.000	.00
36	45	44	5.679	1.200	-.050	.000	.000	-.050	1	.00154	.000	.00
37	34	44	6.946	1.200	-.387	.000	.003	-.387	1	.00802	.000	.00
38	44	43	12.625	1.200	-1.647	.000	.021	-1.647	1	.01033	.000	.00
39	43	51	2.581	1.200	-.009	.000	.000	-.009	1	.00129	.000	.00
40	43	42	10.044	1.200	-.964	.000	.010	-.964	1	.00956	.000	.00
41	42	41	12.868	1.200	-.341	.000	.004	-.341	1	.00206	.000	.00
42	41	40	19.608	1.200	-5.929	.000	.116	-5.929	1	.01542	.000	.00
43	40	1	19.608	1.200	-1.542	.000	.030	-1.542	1	.00401	.000	.00
44	51	50	7.290	1.200	-1.047	.000	.008	-1.047	1	.01971	.000	.00
45	50	1	7.290	1.200	-7.720	.000	.056	-7.720	1	.14528	.000	.00

OTOTAL FAN POWER REQUIREMENT : 165.97 KW
CONVERGENCE INDEX -3.8

BRANCHES WITH MORE THAN 10% FLOW CHANGE

BR. NO.	INI. NODE	FINAL NODE	NEW FLOW	OLD FLOW	CHANGE
2	1	20	12.625	15.000	-2.375
3	10	11	6.740	5.000	1.740
4	10	12	7.533	10.000	-2.467
5	12	13	2.824	5.000	-2.176
7	14	15	1.337	2.000	-.663
8	14	51	3.372	3.000	.372
9	15	51	1.337	2.000	-.663
10	13	42	2.824	5.000	-2.176
11	11	41	6.740	5.000	1.740
12	20	21	12.625	15.000	-2.375
13	21	22	12.625	15.000	-2.375
15	22	23	5.679	8.000	-2.321
16	23	24	1.751	3.000	-1.249
17	23	25	3.928	5.000	-1.072
18	24	26	.873	1.000	-.127
19	24	27	.878	2.000	-1.122
20	27	28	.360	.500	-.140
21	27	29	.518	1.500	-.982
22	25	30	1.336	2.000	-.664
23	25	31	2.592	3.000	-.408
24	31	33	.841	1.000	-.159
25	31	32	1.751	2.000	-.249
26	29	48	.518	1.500	-.982
27	28	48	.360	.500	-.140
28	48	46	.878	2.000	-1.122
29	26	46	.873	1.000	-.127
30	32	49	1.751	2.000	-.249
31	33	49	.841	1.000	-.159
32	49	47	2.592	3.000	-.408
33	30	47	1.336	2.000	-.664
34	47	45	3.928	5.000	-1.072

BR. NO.	INI. NODE	FINAL NODE	NEW FLOW	OLD FLOW	CHANGE
35	46	45	1.751	3.000	-1.249
36	45	44	5.679	8.000	-2.321
38	44	43	12.625	15.000	-2.375
39	43	51	2.581	10.000	-7.419
40	43	42	10.044	5.000	5.044
41	42	41	12.868	10.000	2.868
42	41	40	19.608	15.000	4.608
43	40	1	19.608	15.000	4.608
44	51	50	7.290	15.000	-7.710
45	50	1	7.290	15.000	-7.710

1

NODE PRESSURES RELATIVE TO ATMOSPHERIC

NODE	PRESSURE	NODE	PRESSURE	NODE	PRESSURE	NODE	PRESSURE	NODE	PRESSURE
1	.000	10	328.512	11	5.713	12	176.024	13	6.012
14	19.772	15	7.078	20	2254.084	21	-1150.674	22	241.001
23	106.180	24	21.185	25	27.867	26	9.663	27	10.920
28	9.657	29	9.584	30	10.432	31	12.821	32	10.258
33	10.265	34	10.504	40	1.542	41	5.572	42	5.893
43	8.470	44	10.117	45	10.167	46	9.583	47	10.246
48	9.584	49	10.254	50	7.720	51	6.868		

1*****CONTROL CODE # 9*****

BRANCH #	IN.	FIN.	TYPE	RESISTANCE	FLOW	ADD. DATA	NAT. PRESS.
29	26	46	1	.01000	1.000	.000	.000
30	32	49	1	.00129	2.000	.000	.000
31	33	49	1	.01521	1.000	.000	.000
32	49	47	1	.00129	3.000	.000	.000
33	30	47	1	.00563	2.000	.000	.000
34	47	45	1	.00514	5.000	.000	.000
35	46	45	1	.00488	3.000	.000	.000
36	45	44	1	.00154	8.000	.000	.000
37	34	44	1	.00802	7.000	.000	.000
38	44	43	1	.01033	15.000	.000	.000
39	43	51	1	.00129	10.000	.000	.000
40	43	42	1	.00956	5.000	.000	.000
41	42	41	1	.00206	10.000	.000	.000
42	41	40	1	.01542	15.000	.000	.000
43	40	1	1	.00401	15.000	.000	.000
44	51	50	1	.01971	15.000	.000	.000
45	50	1	1	.14528	15.000	.000	.000

CIRCUIT CHARACTERISTICS

NODES	34
BRANCHES: TOTAL	45
FAN	3
REGULATED	0
FIXED	0