

AVALIAÇÃO DE CONDIÇÕES DE QUALIDADE DO AR EM MINA SUBTERRÂNEA

Boris Ferreira Gancev

borisgancev@hotmail.com

Resumo. *O presente estudo tem como objetivo levantar as principais questões relacionadas ao conforto térmico e à qualidade do ar no interior de minas subterrâneas, realizar a análise das normas técnicas e suas aplicações. Para a avaliação das condições de qualidade do ar e conforto térmico em mina subterrânea, foi realizado um levantamento de dados em mina de ouro, onde foi possível obter resultados de medições de temperatura de bulbo seco, bulbo úmido, temperatura radiante média, velocidade do ar, e porcentagens de oxigênio e metano em determinados locais no interior da mina. O estudo mostrou como é feito o monitoramento das condições de conforto térmico e qualidade do ar em uma mina subterrânea. Com os dados coletados foi possível realizar uma simulação computacional para o ventilador principal da mina, responsável pelo suprimento de ar aos trabalhadores, bem como verificar o cumprimento das normas NR 15 e NR 17, referentes aos índices IBUTG e TE, e da NR 22, referente ao sistema de ventilação, para os pontos medidos no interior da mina. Níveis críticos de metano, dióxido de carbono e monóxido de carbono, não são atingidos.*

Palavras-chave: *qualidade do ar, conforto térmico, mina subterrânea, ventilação, normas técnicas.*

1 INTRODUÇÃO

As doenças ocupacionais, são aquelas decorrentes da exposição dos trabalhadores aos riscos ambientais, ergonômicos ou de acidentes. O binômio saúde e doença, geralmente associado à medicina, faz parte também do exercício profissional dos engenheiros, que devem atuar na prevenção de riscos através do reconhecimento e das medidas de controle.

Na mineração, atividade fundamental para o desenvolvimento econômico e social de muitos países, os trabalhadores estão susceptíveis a ambientes hostis de trabalho. A qualidade do ar respirado e o conforto termocorporal são questões fundamentais a serem gerenciadas pelas companhias de mineração, especialmente nos processos de lavra subterrânea.

Este estudo tem como objetivo levantar as principais questões relacionadas à qualidade do ar e ao conforto térmico no interior de minas subterrâneas, a análise das normas técnicas e suas aplicações.

2 CARACTERÍSTICAS DO AR NO INTERIOR DA MINA

O ar da mina é normalmente seco, contendo 20,93% de O₂, 79,04% de N₂ e 0,03% de CO₂, em volume. O total de outros gases soma menos que 0,01%. Além destes gases, a atmosfera subterrânea contém pequenas quantidades de outros gases como metano (CH₄), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (Nox), hidrocarbonetos não-oxidados e parcialmente oxidados, amônia (NH₃), gás sulfídrico (H₂S) e dióxido de enxofre (SO₂), mesmo sob condições normais. As características de alguns destes gases aparecem na tabela 1 (VUTUKURI; LAMA, 1986).

Os gases presentes na atmosfera da mina podem ser provenientes dos motores a combustão, das detonações, do maciço, da oxidação de madeira ou minérios sulfetados, entre outros. Estes gases podem ser divididos em: gases tóxicos e gases explosivos.

3 MONITORAMENTO DE GASES

Equipamentos para monitoramento de gases tóxicos podem utilizar diferentes princípios de funcionamento. A escolha do método de detecção deve ser feita em função das características de cada processo e das condições específicas da aplicação. Os dados obtidos pelos instrumentos de detecção indicarão a liberação de uma área para um trabalho seguro, ou mesmo a interdição e evacuação imediata do local.

Os métodos mais utilizados incluem o PID (Photo Ionization Detector: Detector por Foto Ionização), FID (Flame Ionization Detector: Detector por Ionização de Chama), ou ainda, os Sensores Catalíticos de Compensação ou Sensores Eletroquímicos.

4 CONTROLE DE GASES

Os gases prejudiciais das minas subterrâneas são originados, geralmente, pelas seguintes situações:

- Detonação de explosivos;
- Utilização de máquinas a diesel;
- Mineração de carvão;
- Explosões subterrâneas e fogo;
- Oxidação de madeira, carvão, pirita, etc.;
- Perfuração em água parada.

A tabela 1 mostra os limites de concentração, de acordo com a norma NR22, para diversos gases.

Tabela 1. Características dos gases encontrados em minas subterrâneas (VUTUKURI; LAMA, 1986).

Nome	Símbolo	Peso Específico (kg/m ³)	Propriedades Físicas	Efeitos Danosos	Origem	Concentração Máxima (%)	Ponto Fatal (%)
Oxigênio	O	1.1056	Inodoro, Incolor, Insípido	Não Tóxico	Ar Normal	19 (mínimo)	6,0
Nitrogênio	N	0.9673	Inodoro, Incolor, Insípido	Asfixiante	Ar Normal, Extrato	80	-
Dióxido de Carbono	CO ₂	1.5291	Inodoro, Incolor, Sabor levemente ácido	Asfixiante	Respiração, Extrato, Explosão, Máquinas a diesel, Combustão	TLV-TWA 0,5 TLV-STEL 1,5	18,0
Metano	CH ₄	0.5545	Inodoro, Incolor, Insípido	Asfixiante, Explosivo	Extrato, Detonação, Máquinas a diesel, Decaimento orgânico	1,0 – 1,25	5,3-14,0 (Explosivo)
Monóxido de Carbono	CO	0.9672	Inodoro, Incolor, Insípido	Asfixiante, Explosivo	Detonação, Máquinas a diesel, Fogo, Qualquer combustão incompleta	TLV-TWA 0,005 TLV-STEL 0,04	0,03 12,5 - 74 (Explosivo)
Óxidos de Nitrogênio	NO ₂	1.5985	Cheiro difícil de perceber, Incolor, Relativamente insolúvel em água	Irritante	Detonação, Máquinas a diesel, combustão incompleta	TLV-C 0,005	0,005
	NO	1.0400	Cheiro distinto, Cor marrom avermelhado, Muito solúvel em água	Irritante, Venenoso		TLV-TWA 0,0025 TLV-C 0,0035	
Gás sulfídrico	H ₂ S	1.1912	Odor de ovo estragado, Incolor, Sabor ácido	Irritante, Venenoso, Explosivo	Água de extrato, Gás de extrato, Detonação	TLV-TWA 0,001 TLV-STEL 0,0015	0,1 4-44 (Explosivo)
Dióxido de Enxofre	SO ₂	2.2636	Odor irritante, Incolor, Sabor ácido	Irritante, Venenoso	Máquinas a diesel, Detonação e combustão de certos minérios de sulfeto, Fogo	TLV-C 0,0005	0,1

Notas:

- 1) TLV – Threshold limit values – São valores referentes à concentração de agentes tóxicos no ar e representam as condições nas quais os trabalhadores podem ser repetidamente expostos, dia após dia, sem efeitos adversos. São três as categorias de TLV's:
- 2) TLV-TWA – Time-weighted average: Concentração média considerando 40 horas de trabalho por semana.
- 3) TLV-STEL – Short-term exposure limit: Máxima concentração para exposição de até 15 minutos, sem efeitos adversos, considerando não mais que 4 exposições por dia, com pelo menos 60 minutos entre elas e não excedendo o TLV-TWA.
- 4) TLV-C – Ceiling: Esta é a concentração que não pode ser excedida por nenhum momento.

As técnicas utilizadas para manter os gases em níveis aceitáveis dependem do tipo de gás e da natureza de sua ocorrência. As mais utilizadas para prevenir a exposição de pessoas aos gases de minas são:

- Prevenção da formação de gases;
- Prevenção da exposição de pessoas;
- Diluição dos gases;
- Remoção dos gases.

A quantidade de ar fresco necessário para se diluir um gás contaminante ao seu limite de tolerância legal, pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$Q_{(ar)} = q_{(gás)} \left[\frac{(C_{gi} - C_{LT})}{(C_{LT} - C_{Qar})} \right] \quad (1)$$

onde:

$Q_{(ar)}$ = vazão necessária de ar fresco em m³/s;

$q_{(gás)}$ = vazão do fluido poluente em m³/s;

C_{gi} = concentração de gás puro no volume de fluido sendo colocado na atmosfera da mina, em fração (entre 0 e 1 ou $C_{gi} \times 100 = \%$);

C_{LT} = concentração limite de tolerância legal, em fração ou $C_{LT} \times 100 = \%$;

C_{Qar} = concentração do poluente no ar fresco diluidor, em fração ou $C_{Qar} \times 100 = \%$;

Algumas minas possuem detectores de gases tóxicos (e explosivos) espalhados em determinados pontos no subsolo. Estes detectores estão conectados a um computador central, que também controla as vazões do sistema de ventilação no interior da mina. Quando uma determinada área alcança níveis de concentrações de gases tóxicos elevados, o sistema automaticamente detecta a ocorrência e direciona para aquela área uma porcentagem maior do ar insuflado no interior da mina, alterando a abertura e o fechamento de *dumppers* de distribuição do ar.

5 MATERIAL PARTICULADO

O material particulado de interesse na lavra em subsolo está na faixa granulométrica de até cerca de 100 micrometros. Para a poeira gerada e emitida na atmosfera, a distância de transporte (Dt) é função da velocidade do ar e da taxa de deposição (TD). A taxa de deposição, por sua vez, é função do tamanho das partículas, da sua forma, da massa específica, das condições psicrométricas do ar, entre outros fatores.

Algumas medidas simples para a diminuição dos problemas de poeira são:

- Infusão de água;
- Umedecimento de pisos;
- Borrifamento de água na perfuração e no minério desmontado;
- Uso de sistema de filtragem associado aos ventiladores;
- Uso de material particulado inerte no caso de poeiras explosivas.

6 ENFERMIDADES RELACIONADAS À QUALIDADE DO AR

As doenças pulmonares de origem ocupacional são causadas pela inalação de partículas, névoas, vapores ou gases nocivos no ambiente de trabalho. O local exato das vias aéreas ou dos pulmões onde a substância inalada irá se depositar e o tipo de doença pulmonar que irá ocorrer dependerão do tamanho e do tipo das partículas inaladas. As partículas maiores podem ficar retidas nas narinas ou nas grandes vias aéreas, mas as menores atingem os pulmões.

São exemplos de enfermidades:

- Silicose
- Pulmão negro
- Asbestose
- Pneumoconiose benigna

7 VENTILAÇÃO SUBTERRÂNEA

A ventilação em mina subterrânea tem como principal objetivo fornecer um fluxo de ar fresco (limpo), natural ou artificial, a todos os locais de trabalho em subsolo, em quantidades suficientes para manter as condições necessárias de higiene e de segurança dos trabalhadores. Uma ventilação inadequada torna as condições ambientais da mina precárias para os operários e equipamentos, representando para a empresa uma perda de produtividade. De uma maneira simplificada, pode-se resumir o papel da ventilação em (VUTUKURI; LAMA, 1986):

- Permitir a manutenção de uma quantidade adequada de oxigênio aos operários;
- Suprimir os gases tóxicos oriundos do desmonte de rochas com explosivos;
- Evitar a formação de misturas explosivas gás-ar;
- Eliminar concentrações de poeiras em suspensão;
- Diluir os gases oriundos da combustão de motores;
- Atenuar a temperatura e a umidade excessiva.

As técnicas de ventilação de mina podem ser resumidas basicamente em duas categorias: ventilação natural e ventilação mecânica. A ventilação natural é uma técnica utilizada desde os primórdios da mineração. É causada pela diferença de temperatura do ar no interior da mina em relação ao ar externo.

7.1 A NORMA REGULAMENTADORA NR 22

A norma que regulamenta os critérios a serem cumpridos pelo sistema de ventilação da mina é a NR 22 (MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, 1999), que estabelece que o sistema de ventilação deve atender aos seguintes requisitos:

- suprimento de oxigênio; (222.573-5/ I4)
- renovação contínua do ar; (222.574-3/ I4)
- diluição eficaz de gases inflamáveis ou nocivos e de poeiras do ambiente de trabalho; (222.575-1/I4)
- temperatura e umidade adequadas ao trabalho humano e (222.576-0/ I4)
- ser mantido e operado de forma regular e contínua. (222.577-8/ I4)

7.2 DIMENSIONAMENTO DO VENTILADOR

Para que seja possível atingir os requisitos da norma NR 22 é necessário que o sistema de ventilação seja capaz de fornecer vazões de ar preconizadas pela norma. Para tal é necessário determinar as vazões necessárias de acordo com a norma e instalar ventiladores capazes de fornecer estas vazões, com diferencial de pressão capaz de vencer as perdas de carga no escoamento do ar pela mina.

O dimensionamento de ventiladores para uma instalação subterrânea é feito através de softwares de simulação: o Ventisim (ventilation simulation) e o Mivena (mine ventilation analysis). No presente trabalho foi utilizado o software Ventisim e os resultados são apresentados no item 10.

8 CONFORTO TERMOCORPORAL

Um outro problema de minas subterrâneas se refere ao conforto termocorporal. A literatura aponta mais de 23 fontes de calor em subsolo, destacando-se o fluxo geotérmico, motores a combustão, o uso de explosivos, a rede de iluminação, a oxidação de certos tipos de minérios, a infiltração de águas termais, movimentação do maciço, a rede de ar comprimido e a presença de grande número de trabalhadores em certos tipos de lavra – são algumas das fontes de calor características de uma lavra em subsolo.

O problema do conforto térmico em subsolo não só envolve as fontes de calor como também deve ser analisado em termos das condições psicrométricas, ou seja, da umidade e da velocidade do ar nas galerias e realces, além da compressão adiabática nos poços de influxo de ar.

O conforto térmico nas minas está diretamente relacionado com a produtividade e ainda associado a acidentes e doenças térmicas como exaustão, síncope, câibras, sudamina e perdas de sais minerais. Com as minas cada vez mais profundas, superando 3.000m, aumenta a preocupação com os sistemas de ventilação e refrigeração.

Com relação à produtividade, dados obtidos para minas sul-africanas de ouro indicam uma sensível queda de produção. Sabe-se que, a partir de uma determinada faixa de temperatura, o rendimento do trabalhador é reduzido de forma drástica, chegando a doenças ou acidentes como mostrado na tabela 3.

Tabela 3 - Queda do rendimento (R) com a temperatura do ar (T) em trabalhos pesados de perfuração, com perfuradores experientes, aclimatados, trabalhando 3 horas consecutivas nas frentes de trabalho (ESTON, 2005).

T(°C)	R(%)
28.9	100
32.8	75
35.5	50
36.4	30
37.0	25

Além das condições de temperatura, velocidade e umidade do ar e da temperatura radiante média do ambiente, distribuições não-uniformes de temperatura, radiação e velocidade também afetam a sensação de conforto térmico. É por este motivo que a temperatura radiante assimétrica também deve ser medida, bem como a velocidade e temperatura do ar em vários níveis. Com essas medições será possível estabelecer se há desconforto térmico local, devido à:

- temperatura radiante assimétrica muito alta;
- diferença de temperatura ao longo do corpo muito grande, por exemplo, ar frio nos pés e ar quente na cabeça;
- correntes de ar que podem causar sensação de frio em algumas regiões.

8.1 A NORMA REGULAMENTADORA NR 15

A exposição ao calor deve ser avaliada por meio do “Índice de Bulbo Úmido e Termômetro de Globo” – IBUTG definido pelas equações que se seguem e que estão na NR 15 (MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, 1978):

Ambientes internos ou externos sem carga solar:

$$\text{IBUTG} = 0,7 \text{ tbn} + 0,3 \text{ tg} \quad (2)$$

Ambientes externos com carga solar:

$$\text{IBUTG} = 0,7 \text{ tbn} + 0,1 \text{ tbs} + 0,2 \text{ tg} \quad (3)$$

onde: tbn = temperatura de bulbo úmido natural
 tg = temperatura de globo
 tbs = temperatura de bulbo seco

Os equipamentos que devem ser usados nesta avaliação são termômetro de bulbo úmido natural, termômetro de globo e termômetro de mercúrio comum. As medições devem ser efetuadas no local onde permanece o trabalhador, à altura da região do corpo mais atingida.

Em função do índice obtido, o regime de trabalho intermitente será definido conforme apresentado na tabela 4.

Tabela 4 - Regime de trabalho em função do IBUTG obtido (NR 15:1978)

Regime de trabalho intermitente com descanso no próprio local de trabalho (por hora)	Tipo de Atividade		
	Leve	Moderada	Pesada
Trabalho Contínuo	até 30,0	até 26,7	até 25,0
45 minutos trabalho 15 minutos descanso	30,1 a 30,6	26,8 a 28,0	25,1 a 25,9
30 minutos trabalho 30 minutos descanso	30,7 a 31,4	28,1 a 29,4	26,0 a 27,9
15 minutos trabalho 45 minutos descanso	31,5 a 32,2	29,5 a 31,1	28,0 a 30,0
Não é permitido o trabalho sem a adoção de medidas adequadas de controle	Acima de 32,2	acima de 31,1	acima de 30,0

8.2 TEMPERATURA EFETIVA (NR 17)

Existem diversos métodos e estudos que permitem avaliar, mediante a utilização de um índice, as características do ambiente, bem como, os limites aceitáveis de exposição ao calor aos quais podem estar expostos os trabalhadores. No entanto, devido à grande quantidade de variáveis envolvidas no processo, não se conseguiu ainda nenhum método que reflita de maneira fiel a avaliação da sobrecarga térmica.

O índice de temperatura efetiva foi inicialmente proposto (1923) pela American Society of Heating and Ventilating Engineers (ASHVE). Concebido a princípio como um critério de avaliação de conforto térmico, o método está baseado no estudo das respostas de grandes conjuntos de pessoas que trabalham em ambientes com diferentes combinações de temperatura, umidade e movimentação de ar. A idéia fundamental do método foi de reunir, em uma única designação, ou seja, em um Índice, todas as condições climáticas que produzem uma mesma ação fisiológica.

Assim, por exemplo, as condições de temperatura do ar de 20°C com umidade relativa de 100%, sem movimentação de ar ($V = 0$ m/s) corresponderá a uma temperatura efetiva de 20°C.

Podem ser verificadas outras temperaturas que, para umidades relativas diferentes, provoquem as mesmas sensações de calor que a temperatura efetiva de 20°C. Isso ocorre para as condições do ambiente com umidade relativa do ar de 20% e temperatura de 24°C (sem movimentação de ar). Todas as respostas subjetivas podem ser plotadas em gráficos (diagramas psicrométricos) e com eles obtidos os valores do índice de temperatura efetiva.

O índice de temperatura efetiva leva em consideração os seguintes parâmetros: -Temperatura do ar (bulbo seco) – (°C); Umidade relativa do ar – (%); Velocidade do ar – (m/s).

Esse índice já foi adotado no Brasil para a caracterização de condições insalubres baseadas em avaliações qualitativas ($TE > 28^\circ\text{C}$ - Portaria 491 de 16 de setembro de 1965), tendo sido revogado quando entrou em vigor a Portaria 3.214/78 - NR 15 de 1978, que instituiu o IBUTG como índice de avaliação das condições de insalubridade.

Atualmente, o índice de temperatura efetiva é adotado como parâmetro na determinação de conforto térmico, conforme aparece na NR 17 – Ergonomia (MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, 1990), item 17.5.2 - alínea “b”, que diz que o índice de temperatura efetiva deve estar entre 20°C e 23°C.

9 LEVANTAMENTO DE DADOS REALIZADO NA MINA

A figura 1 mostra o fluxograma do sistema de ventilação da mina Cuiabá, mostrando os níveis nos quais foram feitas as medições para avaliação das condições de conforto térmico e qualidade do ar no interior da mina. A mina de ouro estudada, conta com um técnico responsável por realizar medições de temperatura (TBS e TBU), velocidade do ar, temperatura radiante média e porcentagens de gases, diariamente, em diversos pontos críticos ao longo de cada nível de profundidade.

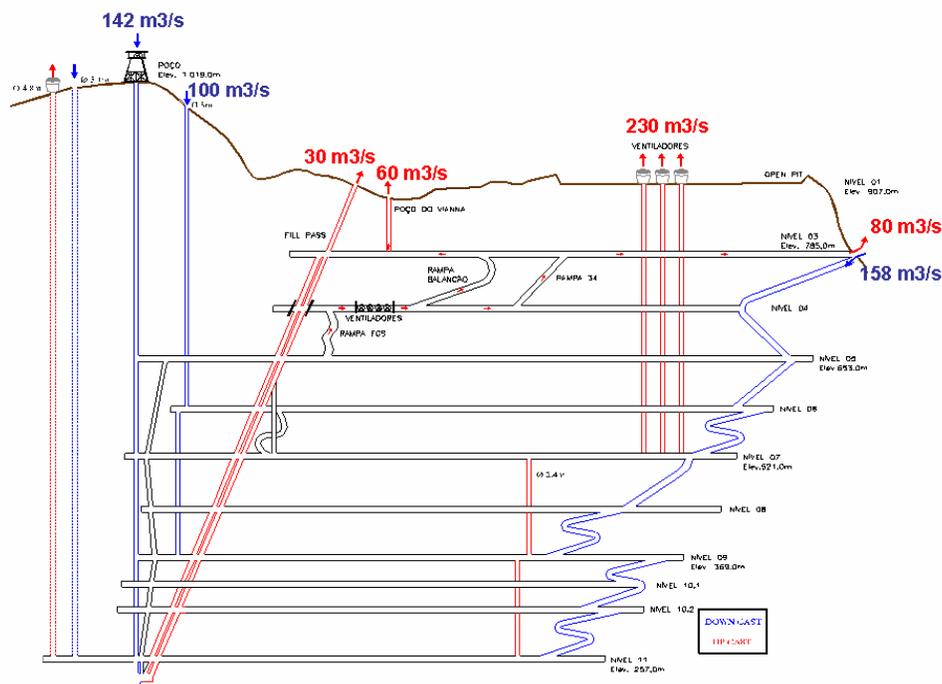


Figura 1- Fluxograma do sistema de ventilação da mina

. As medições foram realizadas “in loco” juntamente com o técnico responsável. Os equipamentos utilizados para medição foram os seguintes:

- Anemômetro de pás digital, do fabricante “Airflow” número de série A19428, utilizado para avaliar a velocidade do ar nos pontos de medição. A calibração deste equipamento ocorreu em 03/11/2005.
- Indicador de oxigênio – Modelo “Pulsar Plus” número de série A1-18736, utilizado para avaliar a porcentagem de oxigênio no ar nos pontos de medição. Calibrado em 05/12/2005.
- Metanômetro – Marca “MSA” modelo Titan número de série 10029054, utilizado para avaliar a porcentagem de metano no ar nos pontos de medição. Calibrado em 30/05/2006.
- Termômetro – Fabricante “Quest Technologies” modelo QT36, foi utilizado para avaliar as temperaturas de bulbo seco, úmido e radiante média.

10. RESULTADOS

10.1 MEDIÇÕES E AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA EQUIVALENTE E DO ÍNDICE IBUTG

A tabela 5 apresenta os resultados da velocidade do ar, vazão, porcentagens de metano (CH₄) e oxigênio (O₂), temperatura de bulbo úmido (TBU), temperatura de bulbo seco (TBS) e temperatura efetiva (TE) calculada, para os locais onde a temperatura efetiva esteve dentro dos limites estabelecidos pelo índice TE (20°C <TE<23°C).

Tabela 5 – Valores de medição no interior da mina em locais com TE dentro dos limites estabelecidos pela NR 22

Local	Vel (m/s)	Área (m2)	Vazão (m3/s)	TBU (°C)	TBS (°C)	TE (°C)	CH4	Oxigênio
AF5– Entrada do nível 7	0,3	9,33	2.8	18.00	22.5°	21.00	0,0%	21,3
AF11 – Rampa nível 8 Galinheiro	0,7	17,20	12	23.50	24.0°	22.50	0,0%	21,0
AF13 – Entrada realce 8 Serrotinho (Desativado)	0,6	17,47	10.4	23.00	24.0°	23.00	0,0%	21,2
AF14 – Rampa nível 8 Serrotinho	1,0	25,00	25	23.50	25.5°	23.00	0,0%	20,5
AF16 - Entrada Realce 9 Serrotinho	2,8	20,00	56	23.00	24.0°	20.00	0,0%	21,0
AF22 –Entrada Realce 10.1 Serrotinho	2,0	18,75	37.5	22.00	24.0°	20.00	0,0%	21,2
AF23—Entrada Realce 10.1 FGS	2,0	17,80	35.6	23.00	24.0°	20.00	0,0%	21,1
AF33 – Estação de Carga	0,4	23,80	9.5	22.00	24.5°	23.00	0,0%	20,1

A tabela 6 apresenta os resultados da velocidade do ar, vazão, porcentagens de metano (CH₄) e oxigênio (O₂), temperatura de bulbo úmido (TBU), temperatura de bulbo seco (TBS) e temperatura efetiva (TE) calculada, para os locais onde a temperatura efetiva esteve acima do limite estabelecido pelo índice TE (TE>23°C).

Tabela 6 – Valores de medição no interior da mina em locais com TE acima dos limites estabelecidos pela NR 22

Local	Vel (m/s)	Área (m2)	Vazão (m3/s)	TBU (°C)	TBS (°C)	TE (°C)	CH4	Oxigênio
AF18 – Cabeceira 9 Balancão	1,0	25,00	25	24.50	26.0°	23.50	0,0%	21,2
AF21 – Cabeceira 10.2 FGS (Estéril)	1,0	25,00	25	25.00	27.0°	24.00	0,0%	21,2
AF24 – Alto da rampa do nível 10 para nível 11	1,6	21,00	33.6	25.00	27.0°	24.00	0,0%	21,3
AF26---Nível 11 p/ travessa p/ Ventilação	0,5	24,00	12.0	24.50	26.5°	24.50	0,0%	20,1
AF27 – Rampa nível 11 p/ nível 12 Serrotinho	1,0	25,00	25	27.00	29.5°	26.50	0,0%	20,1
AF28---Rampa nível 11 p/ nível 10.2 Serrotinho	1,0	25,00	25	26.00	28.0°	25.00	0,0%	21,0
AF29– Cabeceira 12.1 FGS	1,0	25,00	25	26.50	28.0°	25.50	0,0%	20,6
AF30 – Cabeceira 12 Serrotinho	1,0	25,00	25	26.50	28.5°	26.00	0,0%	21,0
AF31 – Drive 01	1,3	15,40	20	26.50	28.0°	25.50	0,0%	21,5
AF32 – Drive 02	1,2	12,57	15	26.00	27.5°	25.00	0,0%	21,3

Para a avaliação do índice IBUTG, que possui efeitos legais sobre a empresa, a medição é realizada segundo a metodologia da Fundacentro (NHT 01 C/E) estabelecida em 1985 (NETTO, 2003). Esta metodologia foi elaborada tomando-se por base a avaliação executada com o auxílio de “árvore de termômetros”. Na época da elaboração da metodologia o número de equipamentos eletrônicos era muito reduzido. Atualmente, com o avanço da tecnologia digital os profissionais envolvidos contam com equipamentos eletrônicos bastante precisos e repletos de recursos (armazenamento de várias medições, impressão de resultados e outros), e ainda com a vantagem de serem equipamentos portáteis bem mais fáceis de serem montados e transportados. Resultados de medição fornecidos pela mineradora são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Avaliações de IBUTG do mês de outubro de 2006.

RELAÇÃO DE AVALIAÇÕES DE IBUTG DO MÊS DE OUTUBRO (Anglo Gold, 2006)			
ATIVIDADE	LOCAL	IBUTG MÉDIO	IBUTG PERMISSÍVEL
Saneamento manual de teto e laterais	Rampa 10.1 Serrotinho	25,79	30,00
Operação com Jumbo na atividade de perfuração para detonação	Rampa 10.2 Serrotinho para o nível 12	25,63	30,00
Auxiliando o Scaler no Saneamento manual de teto e laterais	Rampa do nível 12 para o nível 13	26,74	30,00
Operação do Simba JE 15 na atividade de perfuração para cabeamento	Realce 8 Balancão	21,40	30,00
Marcação para perfuração para cabeamento	Rampa do nível 11 para o nível 12.	25,60	30,00
Umidificação de material	Realce 8 Fonte Grande	26,20	30,00
Operação de Jumbo na atividade de perfuração para cabeamento (Cabletec JE 34)	Realce 9 Serrotinho	18,70	30,00
Auxiliando o Scaler no Saneamento manual de teto e laterais	Realce 10.1 Fonte Grande	22,00	30,00
Limpeza em frente de desenvolvimento	Rampa 12.1 Serrotinho	29,00	30,00
Operação com Jumbo na atividade de perfuração para detonação	Rampa 10.2 Serrotinho	25,40	30,00
Operação da Sonda LM 30	Praça da Sonda Móvel LM 30 na Rampa do 10.2 Serrotinho	25,20	30,00
Operação de normet	Realce 9 Serrotinho	25,00	30,00
Operação com Jumbo na atividade de perfuração para detonação	Rampa do 11 Serrotinho Subnível	26,00	30,00
Montagem da máquina perfuratriz Robbins (Raise Borer)	Praça da Robbins na frente de desenvolvimento 8 Galinheiro	23,30	30,00

10.2 DETERMINAÇÃO DAS VAZÕES E DO DIFERENCIAL DE PRESSÃO DO VENTILADOR PRINCIPAL

Na simulação para determinação do diferencial de pressão que o ventilador principal deverá vencer foram feitas as seguintes hipóteses:

- A seção transversal das ruas internas foi aproximada para uma seção circular onde o diâmetro foi obtido a partir da área fornecida para a seção.
- As ruas internas foram posicionadas, no software, no mesmo plano.
- Para o coeficiente de perda de carga (f) foi utilizado o valor 0.009 (PROSSER, WALLACE, 1997).
- A temperatura do ar ambiente, usada para avaliar a massa específica do ar na face de sucção do ventilador foi de 21°C, que é a média anual para a cidade de belo horizonte (CLIMATEMPO).
- A simulação da variável potência instalada (veículos) foi feita com base na norma NR 22:1989 que estabelece uma quantidade mínima de ar a ser insuflado de 2m³/(min/pessoa) e de 0,48 m³/(min/kw instalado

Na Tabela 8 são apresentados os valores de vazão necessários em função do número de pessoas e das potências instaladas.

Tabela 8 - Vazões de ar em função do número de pessoas e potência instalada

a \ b	150	300	450	600	750	900	1050	1200	1350	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550	2700	2850	3000
500	26	35	44	53	62	71	80	89	98	107	116	126	135	144	153	162	171	180	189	198
550	27	36	46	55	64	73	82	91	100	109	118	127	136	145	154	163	173	182	191	200
600	29	38	47	56	65	74	83	93	102	111	120	129	138	147	156	165	174	183	192	201
650	31	40	49	58	67	76	85	94	103	112	121	131	140	149	158	167	176	185	194	203
700	32	41	51	60	69	78	87	96	105	114	123	132	141	150	159	168	178	187	196	205
750	34	43	52	61	70	79	88	98	107	116	125	134	143	152	161	170	179	188	197	206
800	36	45	54	63	72	81	90	99	108	117	126	136	145	154	163	172	181	190	199	208
850	37	46	56	65	74	83	92	101	110	119	128	137	146	155	164	173	183	192	201	210
900	39	48	57	66	75	84	93	103	112	121	130	139	148	157	166	175	184	193	202	211
950	41	50	59	68	77	86	95	104	113	122	131	140	150	159	168	177	186	195	204	213
1000	42	51	61	70	79	88	97	106	115	124	133	142	151	160	169	178	188	197	206	215
1050	44	53	62	71	80	89	98	108	117	126	135	144	153	162	171	180	189	198	207	216
1100	46	55	64	73	82	91	100	109	118	127	136	145	155	164	173	182	191	200	209	218
1150	47	56	66	75	84	93	102	111	120	129	138	147	156	165	174	183	193	202	211	220
1200	49	58	67	76	85	94	103	113	122	131	140	149	158	167	176	185	194	203	212	221
1250	51	60	69	78	87	96	105	114	123	132	141	150	160	169	178	187	196	205	214	223
1300	52	61	71	80	89	98	107	116	125	134	143	152	161	170	179	188	198	207	216	225
1350	54	63	72	81	90	99	108	118	127	136	145	154	163	172	181	190	199	208	217	226
1400	56	65	74	83	92	101	110	119	128	137	146	155	165	174	183	192	201	210	219	228
1450	57	66	76	85	94	103	112	121	130	139	148	157	166	175	184	193	203	212	221	230
1500	59	68	77	86	95	104	113	123	132	141	150	159	168	177	186	195	204	213	222	231
1550	61	70	79	88	97	106	115	124	133	142	151	160	170	179	188	197	206	215	224	233
1600	62	71	80	90	99	108	117	126	135	144	153	162	171	180	189	198	208	217	226	235
1650	64	73	82	91	100	109	118	128	137	146	155	164	173	182	191	200	209	218	227	236
1700	66	75	84	93	102	111	120	129	138	147	156	165	175	184	193	202	211	220	229	238
1750	67	76	85	95	104	113	122	131	140	149	158	167	176	185	194	203	212	222	231	240
1800	69	78	87	96	105	114	123	133	142	151	160	169	178	187	196	205	214	223	232	241
1850	71	80	89	98	107	116	125	134	143	152	161	170	180	189	198	207	216	225	234	243
1900	72	81	90	100	109	118	127	136	145	154	163	172	181	190	199	208	217	227	236	245
1950	74	83	92	101	110	119	128	138	147	156	165	174	183	192	201	210	219	228	237	246

a - trabalhadores no interior da mina

b - potência instalada (cv)

Finalmente, na Tabela 9 são apresentados os valores de diferencial de pressão do ventilador principal. Para uma melhor visualização dos resultados apresentados na Tabela 9, foi construído gráfico apresentado na Figura 2.

Tabela 9 - Diferencial de pressão do ventilador principal

a \ b	150	300	450	600	750	900	1050	1200	1350	1500	1650	1800	1950	2100	2250	2400	2550	2700	2850	3000
500	3,466	3,891	4,251	4,569	4,854	5,114	5,355	5,579	5,790	5,989	6,178	6,357	6,530	6,695	6,853	7,006	7,154	7,297	7,436	7,571
550	3,550	3,961	4,312	4,623	4,903	5,160	5,397	5,619	5,827	6,024	6,211	6,390	6,560	6,724	6,882	7,034	7,181	7,323	7,461	7,595
600	3,631	4,029	4,372	4,676	4,952	5,205	5,439	5,658	5,864	6,059	6,245	6,422	6,591	6,754	6,910	7,061	7,207	7,349	7,486	7,619
650	3,709	4,096	4,431	4,729	5,000	5,249	5,480	5,697	5,901	6,094	6,278	6,453	6,621	6,783	6,938	7,088	7,234	7,374	7,511	7,643
700	3,785	4,160	4,488	4,781	5,047	5,292	5,521	5,735	5,937	6,128	6,310	6,485	6,651	6,812	6,966	7,115	7,260	7,400	7,535	7,667
750	3,858	4,224	4,544	4,831	5,093	5,336	5,561	5,773	5,973	6,162	6,343	6,516	6,681	6,841	6,994	7,142	7,286	7,425	7,560	7,691
800	3,930	4,285	4,599	4,881	5,139	5,378	5,601	5,810	6,008	6,196	6,375	6,547	6,711	6,869	7,022	7,169	7,312	7,450	7,584	7,715
850	3,999	4,346	4,653	4,930	5,184	5,420	5,640	5,847	6,043	6,230	6,407	6,577	6,740	6,898	7,049	7,196	7,337	7,475	7,608	7,738
900	4,066	4,405	4,706	4,978	5,229	5,462	5,679	5,884	6,078	6,263	6,439	6,608	6,770	6,926	7,076	7,222	7,363	7,500	7,632	7,762
950	4,132	4,462	4,758	5,026	5,273	5,503	5,718	5,921	6,113	6,296	6,470	6,638	6,799	6,954	7,103	7,248	7,388	7,524	7,656	7,785
1000	4,195	4,519	4,809	5,073	5,316	5,543	5,756	5,957	6,147	6,328	6,502	6,668	6,828	6,982	7,130	7,274	7,413	7,549	7,680	7,808
1050	4,258	4,574	4,859	5,119	5,359	5,583	5,794	5,992	6,181	6,361	6,533	6,698	6,856	7,009	7,157	7,300	7,439	7,573	7,704	7,831
1100	4,319	4,629	4,908	5,164	5,401	5,623	5,831	6,028	6,215	6,393	6,564	6,727	6,885	7,037	7,184	7,326	7,464	7,597	7,728	7,854
1150	4,378	4,682	4,957	5,209	5,443	5,662	5,868	6,063	6,248	6,425	6,594	6,757	6,913	7,064	7,210	7,351	7,488	7,622	7,751	7,877
1200	4,436	4,734	5,005	5,253	5,484	5,701	5,904	6,097	6,281	6,456	6,624	6,786	6,941	7,091	7,236	7,377	7,513	7,646	7,775	7,900
1250	4,494	4,786	5,052	5,297	5,525	5,739	5,941	6,132	6,314	6,488	6,654	6,815	6,969	7,118	7,262	7,402	7,538	7,670	7,798	7,923
1300	4,549	4,836	5,098	5,340	5,565	5,777	5,976	6,166	6,346	6,519	6,684	6,844	6,997	7,145	7,288	7,427	7,562	7,693	7,821	7,945
1350	4,604	4,886	5,144	5,382	5,605	5,814	6,012	6,200	6,379	6,550	6,714	6,872	7,024	7,172	7,314	7,452	7,587	7,717	7,844	7,968
1400	4,658	4,935	5,189	5,424	5,644	5,851	6,047	6,233	6,411	6,580	6,743	6,900	7,052	7,198	7,340	7,477	7,611	7,741	7,867	7,990
1450	4,711	4,983	5,234	5,466	5,683	5,888	6,082	6,266	6,442	6,611	6,773	6,929	7,079	7,225	7,365	7,502	7,635	7,764	7,890	8,012
1500	4,763	5,031	5,277	5,507	5,722	5,924	6,116	6,299	6,474	6,641	6,802	6,957	7,106	7,251	7,391	7,527	7,659	7,787	7,913	8,035
1550	4,814	5,077	5,321	5,547	5,760	5,960	6,151	6,332	6,505	6,671	6,831	6,984	7,133	7,277	7,416	7,551	7,683	7,811	7,935	8,057
1600	4,864	5,124	5,363	5,587	5,797	5,996	6,184	6,364	6,536	6,701	6,859	7,012	7,160	7,303	7,441	7,576	7,706	7,834	7,958	8,079
1650	4,913	5,169	5,406	5,627	5,835	6,031	6,218	6,396	6,567	6,730	6,888	7,040	7,186	7,328	7,466	7,600	7,730	7,857	7,980	8,101
1700	4,962	5,214	5,447	5,666	5,872	6,066	6,251	6,428	6,597	6,760	6,916	7,067	7,213	7,354	7,491	7,624	7,754	7,880	8,002	8,122
1750	5,010	5,258	5,488	5,704	5,908	6,101	6,284	6,460	6,627	6,789	6,944	7,094	7,239	7,379	7,516	7,648	7,777	7,902	8,025	8,144
1800	5,057	5,301	5,529	5,743	5,944	6,135	6,317	6,491	6,658	6,818	6,972	7,121	7,265	7,405	7,540	7,672	7,800	7,925	8,047	8,166
1850	5,103	5,344	5,569	5,781	5,980	6,169	6,350	6,522	6,687	6,846	7,000	7,148	7,291	7,430	7,565	7,696	7,823	7,948	8,069	8,187
1900	5,149	5,387	5,609	5,818	6,015	6,203	6,382	6,553	6,717	6,875	7,027	7,174	7,317	7,455	7,589	7,719	7,846	7,970	8,091	8,209
1950	5,194	5,429	5,648	5,855	6,051	6,236	6,414	6,584	6,747	6,903	7,055	7,201	7,343	7,480	7,613	7,743	7,869	7,992	8,113	8,230

a - trabalhadores no interior da mina

b - potência instalada (cv)

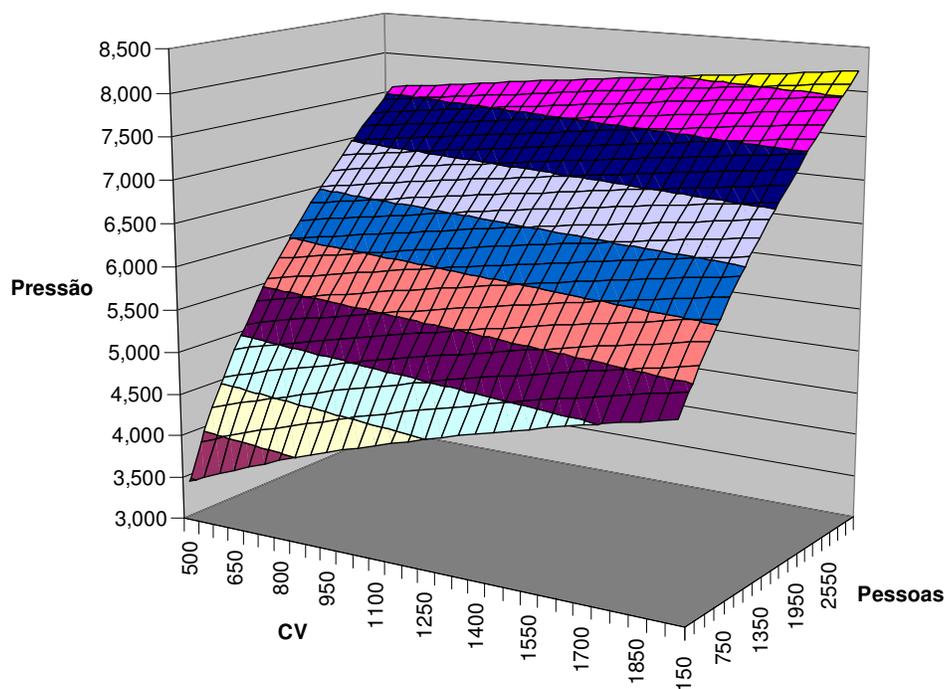


Figura 2 – Resultado de simulação dos níveis de pressão do ventilador principal.

11. CONCLUSÕES

O presente estudo permitiu verificar a complexidade do monitoramento das variáveis de conforto térmico bem como da qualidade do ar em uma mina subterrânea. As condições do ar no interior da mina variam de acordo com a fase do processo de lavra. As normas ABNT NR 15:1978, ABNT NR17:1990 e ABNT NR22:1999, referentes aos índices IBUTG, TE e ventilação, respectivamente, foram cumpridas para todos os pontos onde existiam trabalhadores exercendo atividades. Também foi possível determinar o nível de pressões em função da vazão de ar (número de pessoas e capacidade instalada relativa aos caminhões na mina) para o dimensionamento do ventilador principal, responsável por garantir condições de conforto térmico e a qualidade do ar.

12. REFERÊNCIAS

- ESTON, S. M. Problemas de conforto termo-corporal em minas subterrâneas. *Revista de Higiene Ocupacional*, v. 4, n.13, jul./set. São Paulo. 2005. p.15-17.
- HARTMAN, H. L. *Mine ventilation and air conditioning*. 2nd ed. New York, Wiley. 1982. 791 p.
- MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. Portaria 2.037 de dez. 1999. Normas regulamentadoras de segurança e saúde no trabalho (NR-22): segurança e saúde ocupacional na mineração (122.000-4). Brasília, 1999. Disponível em: <<http://www.mte.gov.br/temas/segsau/legislacao/normas/conteudo/nr22>>. Acesso em: mar. 2006.
- MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. Portaria 3.214 de jul. 1978. Normas regulamentadoras de segurança e saúde no trabalho (NR-15): atividades e operações insalubres (115.000-6). Brasília, 1978. Disponível em: <<http://www.mte.gov.br/temas/segsau/legislacao/normas/conteudo/nr15>>. Acesso em: mar. 2006.
- MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. Portaria 3.751 de nov. 1990. Normas regulamentadoras de segurança e saúde no trabalho (NR-17): ergonomia (117.000-7). Brasília, 1990. Disponível em: <<http://www.mte.gov.br/temas/segsau/legislacao/normas/conteudo/nr17>>. Acesso em: mar. 2006.
- MONTEAU, M. Instrumentação de gestão de segurança no trabalho. Comunicação apresentada ao Colóquio Técnico Internacional AIIT. Varsóvia, abril. 1986.
- NETTO, A. L. SOBES - Sociedade Brasileira de Engenharia de Segurança, Artigo técnico - Exposição ao Calor 1º Parte, Arquivo disponível em <http://www.sobes.org.br>, 2003. 2p.
- VUTUKURI, V. S.; LAMA, R. D. *Environmental engineering in mines*. New York, Cambridge University Press. 1986. 504 p.

EVALUATION OF AIR QUALITY CONDITIONS IN UNDERGROUND MINE

Abstract. The present work has as objective the study of the main subjects related to thermal comfort and air quality conditions inside underground mines, and the analysis of technical norms and their applications. For the evaluation of air quality and thermal comfort conditions in underground mines, data at a gold mine were accomplished. It was possible to obtain results of measurements of dry and humid bulb temperature, medium radiant temperature, air velocity, and percentages of oxygen and methane in certain places inside the mine. The study showed how the accomplishment of the conditions of thermal comfort and air quality in an underground mine is made. With the collected data it was possible to accomplish a computational simulation for the main fan of the mine, responsible for the supply of air to the workers, as well as to verify the execution of the norms NR 15 and NR 17, regarding the indexes IBUTG and TE, and of NR 22, regarding the ventilation system, for the measured points inside the mine. Critical levels of methane, carbon dioxide and carbon monoxide, are not reached.

Key-words: air quality, thermal comfort, underground mines, ventilation, technical norms.