

GABRIEL DE SOUZA AZEVEDO FRANCO

**SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO PARA MINAS
SUBTERRÂNEAS**

São Paulo

2021

GABRIEL DE SOUZA AZEVEDO FRANCO

**SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO PARA MINAS
SUBTERRÂNEAS**

Trabalho de Formatura em Engenharia
de Minas do curso de graduação do
Departamento de Engenharia de Minas e
de Petróleo da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo.

Orientadora:

Prof^a. Dr^a. Anna Luiza Marques Ayres da
Silva

São Paulo

2021

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catalogação-na-Publicação

Franco, Gabriel
SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO PARA MINAS
SUBTERRÂNEAS / G. Franco -- São Paulo, 2021.
50 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

1.Mineração Subterrânea 2.Sistemas de Refrigeração
3.Conforto Térmico I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo
II.t.

A todos aqueles que fazem do mundo
um lugar melhor, especial meus pais.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Franco e Elenice, pelo carinho, incentivo e apoio incondicional durante toda a vida.

À toda minha família, em especial a Carolina Andrade, por todo apoio e carinho durante a graduação e seus desafios.

À minha orientadora, a professora Anna Luiza, pelo suporte durante todo o trabalho, suas correções e incentivos.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Universidade de São Paulo, em especial o professor Maurício Bergerman, que com suas aulas e ensinamentos contribuíram para meu desenvolvimento profissional e pessoal.

Aos engenheiros e profissionais das empresas que contribuíram para a realização deste trabalho.

Por fim, a todos que de alguma forma me deram apoio e contribuíram para meu desenvolvimento e formação.

RESUMO

A mineração subterrânea é utilizada há muitos anos e se tem relatos da preocupação com as condições de trabalho nesses locais desde a Idade Moderna. Uma das maiores preocupações é em relação ao conforto térmico, que está diretamente relacionado com doenças térmicas e acidentes. Para controlar a temperatura foram desenvolvidas técnicas e sistemas capazes de tornar o ambiente de trabalho adequado, sendo a ventilação um destes sistemas. Ao longo do tempo as minas tornaram-se mais profundas e as variáveis de temperatura e equipamentos foram sendo alteradas, fazendo com que outros meios de controle da temperatura fossem necessários, como, por exemplo, a refrigeração. Neste trabalho foram realizados uma pesquisa bibliográfica com estudos de caso e um atual levantamento de dados com o objetivo de entender e exemplificar os sistemas de refrigeração aplicados à mineração. A aplicação deste sistema na mineração possibilitou a expansão de minas subterrâneas, como, por exemplo, as minas de ouro localizadas em Minas Gerais, Brasil e em Gauteng e Limpopo na África do Sul, através do conforto térmico proporcionado aos trabalhadores. Entretanto, seus gastos são altos e necessitam de um grande investimento, o que torna cada projeto específico e com uma elevada carga de pesquisa e estudo.

Palavras-chave: Minas Profundas. Mineração Subterrânea. Conforto Térmico. Sistema de Refrigeração. Ciclo de Refrigeração.

ABSTRACT

Underground mining has been used for many years and there have been reports of concern with local working conditions since the Modern Age. One of the biggest concerns is in relation to thermal comfort, which is directly related to thermal illnesses and accidents. To control the temperature, techniques and systems capable of making the work environment adequate were developed, such as ventilation system. Over time as mines were deepening and as temperature variables and equipment were changing, making other means of temperature control needed, such as refrigeration. In this study, a bibliographical research with case studies and a current data collection were carried out in order to understand and exemplify the mining refrigeration systems. The application of these systems in mining enabled the expansion of underground mines, such as the mandatory gold mines in Minas Gerais, Brazil and in Gauteng and Limpopo in South Africa, through the thermal comfort provided to workers. However, its expenses are high and a large investment is needed, which makes each project specific and with a high load of research and study.

Keywords: Deep Mines. Underground Mining. Thermal Comfort. Cooling System. Refrigeration Cycle.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Trabalho em minerações subterrâneas na Idade Moderna.....	13
Figura 2 - A relação entre produtividade, frequência de acidentes e temperatura do local de trabalho	15
Figura 3 - Variáveis de calor em uma mina subterrânea localizada na Nova Zelândia	17
Figura 4 - Gráfico de quantidade de ar x problemas com o calor e o ponto crítico para utilização da refrigeração	18
Figura 5 - Processo de transferência de calor.....	19
Figura 6 - Ciclo de Refrigeração.....	20
Figura 7 - Esquema de um sistema por Resfriamento de Ar na Superfície.....	22
Figura 8 - Circuito de trocadores de calor instalados no subterrâneo	23
Figura 9 - Gelo utilizado para resfriamento.	24
Figura 10 - Resfriador local de bobina	25
Figura 11 - Cabine com Refrigeração para trabalho em mineração subterrânea	26
Figura 12 - Evaporador	27
Figura 13 - Compressor Hermético	27
Figura 14 - Compressor Semi-hermético	28
Figura 15 - Compressor Aberto	28
Figura 16 - Condensador Evaporativo.....	29
Figura 17 - Válvula de Expansão	30
Figura 18 - Componentes de um Sistema de Refrigeração	31
Figura 19 - Embalagens de Fluidos Refrigerantes	32
Figura 20 - Termômetro de globo.....	34
Figura 21 - Local para fabricação de blocos de gelo.....	35
Figura 22 - Mina de Palabora vista de cima em 2019	36

Figura 23 - Arranjo da Planta de Refrigeração subterrânea	38
Figura 24 - Arranjo do Resfriador de Ar em superfície	38
Figura 25 – Projeto 3D do sistema de refrigeração da mineração Caraíba.....	41
Figura 26 - Projeto 3D do sistema de refrigeração da mineração Cuiabá.....	41
Figura 27 - Módulos Agrekko	42
Figura 28 - Climatizador móvel instalado junto ao ventilador secundário.....	42
Figura 29 - Formulário enviado para as empresas (parte 1)	48
Figura 30 - Formulário enviado para as empresas (parte 2)	49
Figura 31 - Parte da NHO-06	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparaçāo entre todos os sistemas de Refrigeraçāo.....	26
Tabela 2 - Comparaçāo entre Resfriamento por blocos de gelo e água	35
Tabela 3 - Comparaçāo entre as opções de Sistemas de Refrigeraçāo	37
Tabela 4 - Custos com cada opção disponível.....	37
Tabela 5 - Respostas à primeira pergunta	39
Tabela 6 - Respostas à segunda pergunta	39
Tabela 7 - Respostas à terceira pergunta	39
Tabela 8 - Respostas à quarta pergunta	40
Tabela 9 - Respostas à quinta pergunta	40
Tabela 10 - Respostas à sexta pergunta.....	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ANM – Agência Nacional de Mineração
BAC – *Bulk Air Cooler*
CLT – Consolidação das Leis do Trabalho
CFC – Clorofluorcarboneto
HCFC – Hidroclorofluorcarboneto
HFC – Hidrofluorcarboneto
IBUTG – Índice de Bulbo Úmido Termômetro de Globo
NHO – Norma de Higiene Ocupacional
NR – Norma Regulamentadora
NRM – Norma Reguladora de Mineração
SEPRT – Secretaria Especial de Previdência e Trabalho
Tbn ou Tbu – temperatura de bulbo úmido
Tbs – Temperatura de bulbo seco
Tef – Temperatura efetiva
Tg – Temperatura de globo
VRM – *Vertical Retreat Mining*

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	13
2.	OBJETIVO.....	14
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1.	Ventilação.....	14
3.2.	Calor em mina subterrânea	15
3.3.	Refrigeração.....	17
3.4.	Transferência de calor.....	18
3.5.	Ciclo de Refrigeração	19
4.	METODOLOGIA.....	20
4.1.	Pesquisa Bibliográfica	20
4.2.	Levantamento de dados de minas brasileiras com sistema de refrigeração	21
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	22
5.1.	Sistemas de Refrigeração	22
5.1.1.	Sistemas centrais ou primários.....	22
5.1.2.	Sistemas descentralizados ou locais.....	24
5.1.3.	Sistemas específicos ou micro-sistemas.....	25
5.1.4.	Comparação entre os sistemas	26
5.2.	Equipamentos e fluidos empregados nos sistemas de refrigeração.....	26
5.2.1.	Evaporador	26
5.2.2.	Compressor	27
5.2.3.	Condensador	29
5.2.4.	Válvula de expansão	29
5.2.5.	Fluido Refrigerante	30
5.3.	Normas brasileiras.....	32
5.4.	Estudos de caso	34
5.4.1.	Estudo de Caso 1 – <i>Gauteng, África do Sul.</i>	34

5.4.2. Estudo de Caso 2 – <i>Limpopo</i> , África do Sul	36
5.5. Levantamento de dados de minerações brasileiras com Sistema de Refrigeração.....	39
6. CONCLUSÃO.....	43
7. REFERÊNCIAS.....	44
APÊNDICE A – Formulário digital enviado para as empresas	48
ANEXO A – Critério de avaliação presente na norma brasileira	50

1. INTRODUÇÃO

Um dos primeiros registros de preocupação com a saúde do trabalhador na mineração subterrânea aparece no livro "De Re Metallica", de *Georgius Agricola* publicado em 1556 (AGRICOLA, 1556). Neste livro percebe-se a intenção do autor em ilustrar detalhadamente o trabalho nas minas (Figura 1) e quais eram as providências para a manutenção da saúde e segurança em subsolo. Isso demonstra que assuntos que até hoje são muito estudados ao redor do mundo já eram pautados nessa época, como, por exemplo, o conforto térmico, a qualidade do ar e o principal, as condições de trabalho.

Figura 1 - Trabalho em minerações subterrâneas na Idade Moderna



Fonte: Agricola (1950)

Já na Antiguidade surge a ventilação com o propósito de condicionar as minas para possibilitar o trabalho subterrâneo. Essa operação, inicialmente, era induzida com fogueiras para que o ar subisse ou com grandes leques, mas com o passar do tempo as tecnologias foram melhorando e as formas de controle dessas condições também (MCPHERSON, 2018).

Com a consolidação da ventilação e incremento do uso dos métodos de lavra subterrânea, as minas puderam ser aprofundadas e minérios que antes não eram considerados, passaram a ser explotados. Contudo, os desafios

aumentaram e outras tecnologias precisaram ser empregadas, como por exemplo os sistemas de refrigeração.

Segundo McPherson (2018), a refrigeração de minas tem seus primeiros passos nos anos de 1920, mas começa a se tornar realmente relevante no cenário da mineração a partir de 1960. As primeiras aplicações do ciclo de refrigeração por compressão em mineração foram na mina de Morro Velho no Brasil (1923) e minas de carvão na Inglaterra (1926). Posteriormente, essas instalações se tornaram populares em minas de ouro na África do Sul.

Atualmente, o uso desse sistema tem sido mundialmente considerado cada vez mais importante, pois as minas estão progressivamente mais mecanizadas e profundas, tornando-se essencial o controle da temperatura. No Brasil, um grande exemplo disso é o novo projeto para utilização desse sistema na Mineração Caraíba para permitir a continuação do aprofundamento, de mais 300 metros, da Mina Pilar (OLIVEIRA, 2021).

Entretanto, sua utilização gera custos elevados e necessita de análises minuciosas em relação ao gradiente de calor, instalações, equipamentos e formas de trabalho. Em virtude de o conhecimento desses fatores serem essenciais, porém custosos, seus estudos ao redor do mundo crescem cada vez mais.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é entender, portanto, como são os sistemas de refrigeração mineira, quais equipamentos são empregados e como funcionam, ilustrando-os com estudos de caso de minerações estrangeiras e a partir de um atual levantamento de dados nas minerações brasileiras.

Também são apresentadas as normas brasileiras que tratam do assunto.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Ventilação

A ventilação é essencial na mineração subterrânea, pois seu sistema irá fornecer oxigênio para a mina, diluir a poeira e os gases tóxicos, prevenir a formação de misturas explosivas e controlar a umidade e temperatura. Essas atividades

permitem que o ambiente de trabalho se torne menos hostil e os trabalhadores possam realizar seus afazeres com uma boa condição de respiração, uma maior segurança prevenindo a ocorrência de explosões ou intoxicações, e com um conforto termo corporal (HARTMAN et al., 2012).

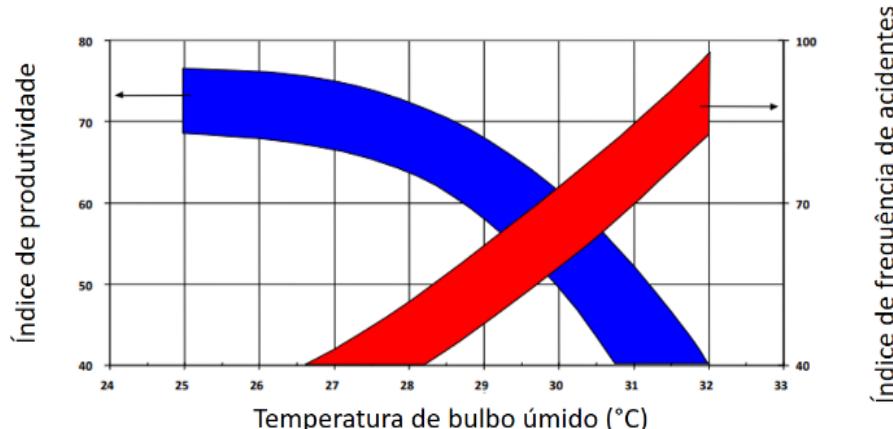
O constante desenvolvimento tecnológico tem permitido que as minas subterrâneas sejam aprofundadas e mecanizadas cada vez mais, fazendo com que as variáveis de geração de calor e gases se alterem e outros meios de controle surjam.

3.2. Calor em mina subterrânea

A temperatura do ambiente de trabalho está diretamente ligada às doenças térmicas e acidentes. As altas temperaturas provocam problemas como a desidratação, o suor excessivo, as cãibras e podem acarretar doenças como a insolação, síncope pelo calor e a exaustão térmica (AYRES DA SILVA, 2021). Cada uma dessas doenças pode trazer diferentes traumas e complicações, sendo algumas das mais graves as convulsões, a perda de consciência e a desorientação (CERDEIRA, 2012).

Além disso, o desempenho dos trabalhadores também é afetado, como podemos ver na Figura 2. Segundo McPherson (2018), o calor é o maior problema ambiental enfrentado e a falta dele, em ambientes de baixas temperaturas, também.

Figura 2 - A relação entre produtividade, frequência de acidentes e temperatura do local de trabalho



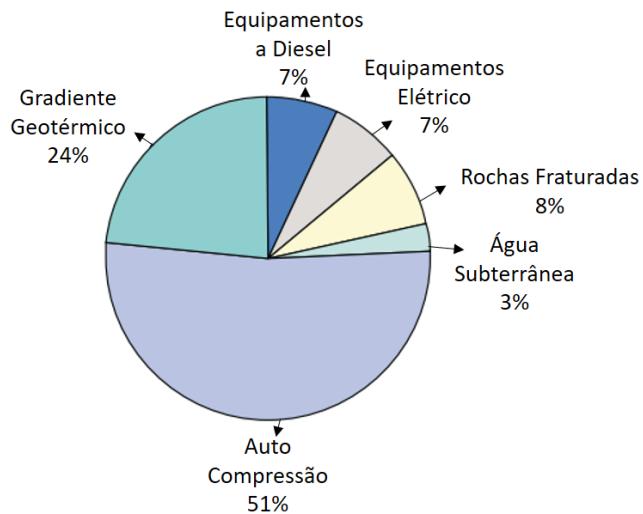
Fonte: Alvarez, 2021.

Conforme McPherson (2018) e Alvarez (2021), esse calor pode ter sua fonte em diversos locais e ambientes, sendo eles:

- Autocompressão: transformação da energia potencial em energia térmica. Como por exemplo, quando o ar captado na superfície flui através de poços até o subsolo;
- Maquinário:
 - Movido à diesel: a constante queima do óleo diesel gera calor que é liberado para o meio;
 - Elétrico: parte da energia elétrica que é absorvida é liberada como energia térmica para o ambiente.
- Maciço rochoso: devido ao gradiente geotérmico, que é a “taxa de aumento da temperatura por unidade de profundidade na terra” (GONZÁLEZ, 2015, p. 24), as rochas liberam calor para o meio. O gradiente geotérmico varia de local para local. É determinado em grande parte pela idade das rochas, suas propriedades térmicas e sua proximidade com atividade ígnea recente ou fontes termais (HARTMAN et al., 2012);
- Infiltrações de água: em virtude das descontinuidades presentes nas rochas (naturalmente ou em função das operações de lavra), a infiltração da água é um fator importante pois sua temperatura poderá fazer com que ela libere ou absorva calor do ambiente;
- Outras fontes:
 - Iluminação: assim como os equipamentos, parte da energia elétrica também é transformada em energia térmica e liberada ao ambiente;
 - Trabalhadores: quando exercem suas atividades absorvem e emanam calor para o meio;
 - Oxidação: contribui com a liberação de calor ao ambiente como por exemplo, a oxidação de minérios sulfetados e a de carvão;
 - Explosivos e detonações: liberam muito calor em um espaço de tempo pequeno e sua variação principal é de acordo com a quantidade de explosivos utilizada.

A quantidade que cada uma das fontes contribui para a elevação da temperatura varia de mina para mina. Um exemplo prático feito em uma mineração na Nova Zelândia é apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Variáveis de calor em uma mina subterrânea localizada na Nova Zelândia



Fonte: Brake; Fulker, 2000.

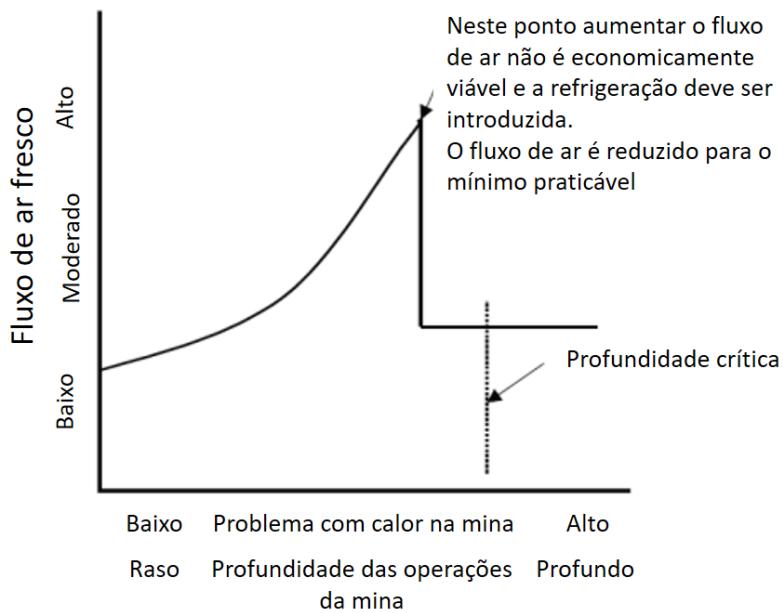
A fim de controlar essa questão tão pertinente e que impacta tanto os trabalhadores, uma tecnologia dedicada apenas a isso é essencial, sendo necessário um estudo maior e constante sobre a refrigeração.

3.3. Refrigeração

Sabe-se que a ventilação está se desenvolvendo com muita rapidez e que a refrigeração é uma tecnologia com alto custo, então a pergunta que surge é "quando devemos deixar de utilizar apenas a ventilação e passar a utilizar a refrigeração também?".

Quando a mina se aprofunda, uma grande quantidade de ar é demandada pela frente de trabalho. Entretanto em uma determinada profundidade não haverá mais efeito na diminuição da temperatura apenas enviar mais ar para aquele local, e é nesse momento que a refrigeração é requisitada. Quando a refrigeração é aplicada, a quantidade do fluxo de ar deve ser reduzida (TEIXEIRA, 2019). Isso é exemplificado na Figura 4.

Figura 4 - Gráfico de quantidade de ar x problemas com o calor e o ponto crítico para utilização da refrigeração



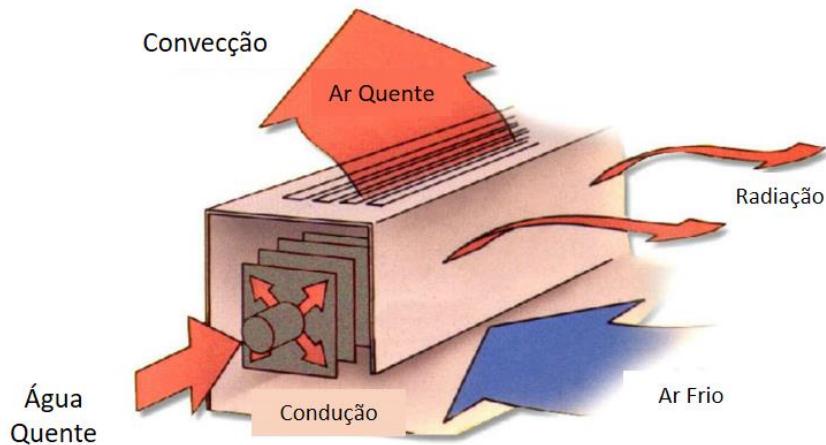
Fonte: Teixeira, 2019.

A partir do momento que a refrigeração se faz necessária, precisa-se entender quais são os seus parâmetros, o que interfere direta e indiretamente na escolha dos equipamentos e como funciona esse sistema.

3.4. Transferência de calor

A transferência de calor pode ocorrer de três formas distintas, a primeira é a condução, que pode ser definida como troca de calor devida à diferença de temperatura entre duas regiões em contato. A segunda é a radiação que ocorre com a troca de calor através de ondas eletromagnéticas entre duas regiões separadas por um meio, e por fim, a convecção, que é feita através da densidade, onde o ar quente sobe e o ar frio desce, criando uma corrente de convecção (TEIXEIRA, 2019). Podemos observar as três formas de transferência de calor na Figura 5.

Figura 5 - Processo de transferência de calor

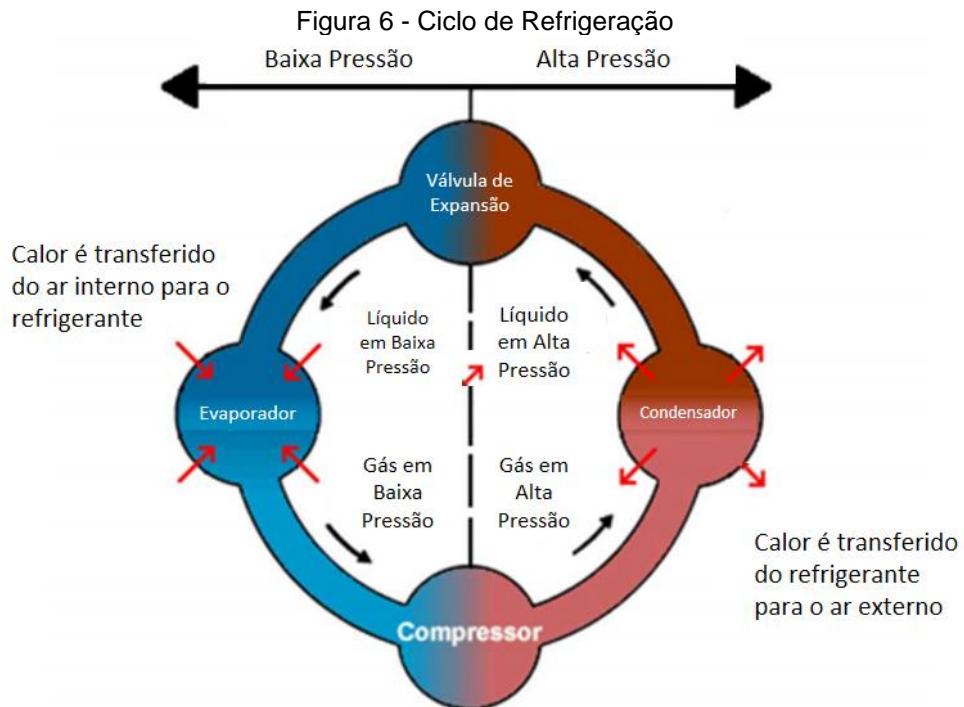


Fonte: Alvarez, 2021.

3.5. Ciclo de Refrigeração

Os ciclos de refrigeração formam a base dos sistemas de refrigeração e são constituídos essencialmente por quatro componentes: o evaporador, o compressor, o condensador e a válvula de expansão. Pode-se definir que um ciclo de refrigeração é a transferência de calor de um lugar para outro por meio de dois processos, a evaporação e a condensação.

Um líquido (refrigerante) é evaporado a pressão praticamente constante, absorvendo calor do ambiente a uma temperatura baixa, e então o vapor produzido é comprimido até uma pressão mais alta, e posteriormente resfriado e condensado com a rejeição de calor em um nível de temperatura mais elevada. O líquido que sai do condensador retorna a sua pressão original através da válvula de expansão (BARALDI, 2015). Todo esse processo pode ser visto na Figura 6.



Fonte: Alvarez, 2021.

4. METODOLOGIA

Para elaboração deste trabalho, a metodologia foi dividida em duas partes. A primeira consistiu em uma extensa pesquisa bibliográfica e a segunda baseou-se no levantamento de dados sobre os sistemas de refrigeração empregados atualmente nas minas brasileiras, como serão explicitados a seguir.

4.1. Pesquisa Bibliográfica

Na primeira parte do trabalho, foi realizada uma abrangente pesquisa bibliográfica com enfoque em explicar e exemplificar a utilização da refrigeração e seu ciclo dentro da área da mineração. A coleta do material se deu entre os meses de fevereiro a novembro de 2021 e utilizou-se de livros, artigos científicos, teses, dissertações e revistas científicas.

As ferramentas de busca utilizadas foram *Google Scholar*, *Sciencedirect*, *Scholarworks*, *Citeseerx* e *Researchgate*. A pesquisa em cada uma das bibliotecas eletrônicas foi baseada nas palavras-chave Refrigeração, Mineração, Mineração Subterrânea, Sistema de Refrigeração, Ciclo de Refrigeração,

Refrigeration, Mining, Underground Mining, Cooling System e Refrigeration Cicle.

Objetivando restringir o número de artigos, teses e dissertações, o critério foi o de selecionar apenas aqueles que apresentassem como tema principal a refrigeração e suas aplicações dentro da mineração, seja ela direta (como métodos e equipamentos) ou indiretamente (ciclos e funcionalidades específicas da refrigeração).

Após aplicação do critério e seleção do que era tangível ao trabalho, foram realizadas leituras exploratórias e seletivas para então realizar a redação de cada tópico deste trabalho.

4.2. Levantamento de dados de minas brasileiras com sistema de refrigeração

Na segunda parte, apresentada na seção 5.5 deste trabalho, o foco foi levantar informações de minas brasileiras que possuem ou estão instalando sistemas de refrigeração. De acordo com o levantamento feito por Vieira, Silva e Ayres da Silva (2021), atualmente apenas 3 minerações apresentam esse sistema e uma está em processo de instalação.

Com todas as minas mapeadas foi elaborado um formulário no formato digital utilizando a plataforma *Google Forms* (Figura 29 e Figura 30 no APÊNDICE A) com 6 perguntas e um item adicional para comentários com o intuito de levantar dados e informações de cada uma. As perguntas foram escolhidas de acordo com os tópicos estudados neste trabalho e são as mesmas para todas as empresas.

O questionário foi enviado por *e-mail* para os profissionais responsáveis de cada uma das minas e os resultados foram obtidos durante o mês de novembro de 2021.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

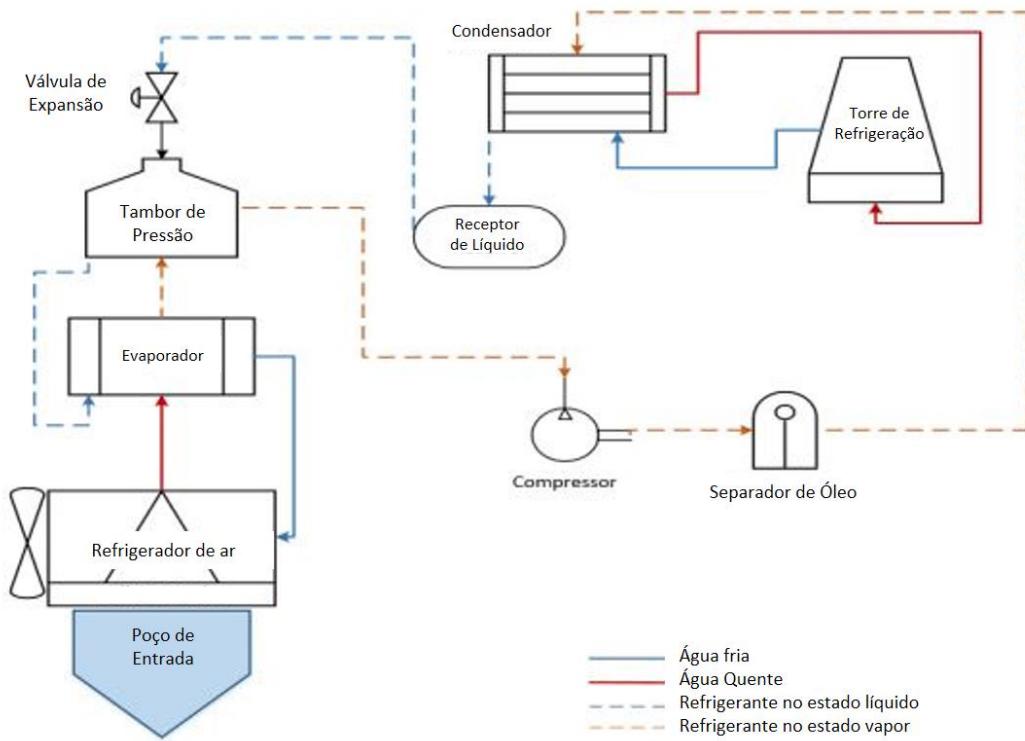
5.1. Sistemas de Refrigeração

5.1.1. Sistemas centrais ou primários

Os sistemas primários são utilizados quando os problemas com calor estão em todos os lugares da mina (são mais gerais) e podem ser divididos em:

- Resfriamento de Ar na Superfície (*Surface Bulk Air Cooling*): esse sistema funciona a partir do fornecimento de ar fresco e água gelada. É a primeira opção a ser considerada por seu custo mais econômico em relação a outros sistemas e por ser mais simples em sua instalação, manutenção e operação. A água gelada troca calor com o ar, o que torna sua aplicação mais restrita, pois os fluidos são facilmente afetados pelo gradiente geotérmico e auto compressão (TEIXEIRA, 2019). A Figura 7 nos traz um exemplo deste tipo de sistema.

Figura 7 - Esquema de um sistema por Resfriamento de Ar na Superfície



Fonte: Kamyar et. al., 2016.

- Resfriamento de Ar em Subsolo (*Underground Bulk Air Cooling*): sistema utilizado quando a temperatura no poço já é aceitável, mas nas frentes de

trabalho não. Um sistema *Surface Bulk Air Cooling* é instalado próximo ao poço de entrada, mas se a distância para os locais que necessitam de refrigeração for grande, sistemas secundários ou até terciários têm que ser instalados em subsolo e os métodos de refrigeração dependem das características específicas do meio. Sua principal desvantagem é a diminuição de sua eficiência, uma vez que sendo as instalações subterrâneas (Figura 8), por vezes o calor retirado de um ambiente acaba elevando a temperatura no local de instalação.

Figura 8 - Circuito de trocadores de calor instalados no subterrâneo



Fonte: Greth et al., 2017.

- Armazenamento de Gelo (*Ice Storage*): sistema menos comum que é possível apenas em lugares com baixas temperaturas onde, em épocas mais frias alguns níveis congelam e esse gelo (Figura 9) é armazenado para resfriamento da mina em épocas com temperaturas mais elevadas. Apenas protótipos deste sistema foram testados e apresentaram um bom controle sobre o resfriamento e uma fácil manutenção, o que o torna uma possibilidade para utilização futura (GRETH et al., 2017).

Figura 9 - Gelo utilizado para resfriamento.



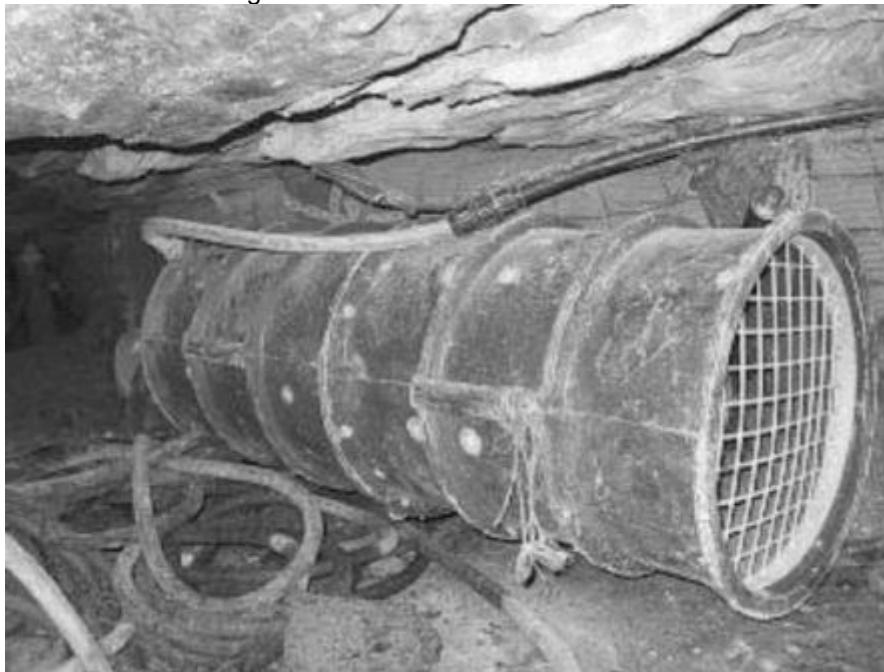
Fonte: Alvarez, 2021

5.1.2. Sistemas descentralizados ou locais

Os sistemas locais são mais específicos e representados pelo:

- Resfriamento Local (*Spot Cooling*): sistema utilizado quando os problemas com o calor estão longe das principais vias. Sua construção consiste basicamente em um evaporador instalado em um duto auxiliar de ventilação e um condensador fora do duto. A mobilidade desses resfriadores fornece ao sistema uma alta eficiência, porém como são instalados em dutos auxiliares, sua capacidade é limitada e sua utilização muitas vezes é junto a um sistema central de resfriamento. A Figura 10 apresenta uma bobina de um resfriador local utilizado nesse sistema.

Figura 10 - Resfriador local de bobina



Fonte: Greth et al., 2017.

5.1.3. Sistemas específicos ou micro-sistemas

Sistemas para locais pequenos e específicos retratados pela:

- Refrigeração de pequenas frentes de trabalho (*Micro-Climate Cooling*): sistema utilizado para resfriamento direto da área de trabalho, porém sua utilização não refrigera todo o ambiente da mina subterrânea e sim cabines específicas ou equipamentos, como por exemplo a cabine do equipamento mostrado na Figura 11. Sua desvantagem é a redução de eficiência e produtividade, já que as frentes de trabalho são muito variáveis e muitas minas ainda não são totalmente mecanizadas.

Figura 11 - Cabine com Refrigeração para trabalho em mineração subterrânea



Fonte: Sandvik, [2021?]

5.1.4. Comparação entre os sistemas

Comparando os sistemas supracitados, a Tabela 1 é apresentada.

Tabela 1 - Comparação entre todos os sistemas de Refrigeração

Sistema de Refrigeração	Capacidade de Refrigeração	Mobilidade	Eficiência	Custo
<i>Surface Bulk Air Cooling</i>	Alto	Estacionário	Baixa	Alto
<i>Underground Bulk Air Cooling</i>	Médio - Alto	Estacionário	Baixa - Média	Alto
<i>Ice Storage</i>	Médio - Alto	Estacionário	Baixa - Média	Médio - Alto
<i>Spot Cooling</i>	Baixo - Médio	Parcialmente Móvel	Média - Alta	Médio - Alto
<i>Micro-Climate Cooling</i>	Baixo	Completamente Móvel	Alta	Baixo

Fonte: Greth et al., 2017.

5.2. Equipamentos e fluidos empregados nos sistemas de refrigeração

5.2.1. Evaporador

É um trocador de calor onde o refrigerante é vaporizado através da absorção de calor do meio (Figura 12), fazendo com que a temperatura do ar diminua (seja resfriado). Essa evaporação acontece a uma pressão constante e o refrigerante que sai do evaporador é um gás superaquecido, cuja temperatura é maior que a temperatura de evaporação (Alvarez, 2021).

Figura 12 - Evaporador



Fonte: Alvarez, 2021

5.2.2. Compressor

Responsável pela compressão do fluido refrigerante, fazendo com que ele circule e sua pressão e temperatura se elevem.

Segundo Alvarez (2021), esse equipamento pode ser classificado como:

- Hermético: possui o motor acoplado e não permite acesso para manutenção (Figura 13), quando há algum problema necessita de troca do equipamento. É mais utilizado para aplicações de pequeno porte.

Figura 13 - Compressor Hermético



Fonte: Alvarez, 2021.

- Semi-hermético: também possui motor acoplado mas há espaço para manutenção (Figura 14). Equipamento mais robusto para utilizações de médio a grande porte.

Figura 14 - Compressor Semi-hermético



Fonte: Alvarez, 2021

- Aberto: não tem o motor acoplado, sua transmissão ocorre através de polia, eixo ou correia (Figura 15). Há uma grande preocupação com vazamentos e necessidade de manutenção constante.

Figura 15 - Compressor Aberto



Fonte: Alvarez, 2021

5.2.3. Condensador

É um trocador de calor onde o refrigerante é condensado através da liberação de calor para um outro ambiente ou fluido (Figura 16). Nesse equipamento o refrigerante é condensado e se torna um líquido com temperatura ligeiramente inferior a temperatura de condensação e alta pressão.

Figura 16 - Condensador Evaporativo



Fonte: Alvarez, 2021

5.2.4. Válvula de expansão

Válvula que promove a expansão do refrigerante com uma redução drástica de pressão e uma queda abrupta de temperatura (Figura 17). No ciclo, é o equipamento que promove a queda desde a pressão de condensação até a pressão de evaporação.

Figura 17 - Válvula de Expansão



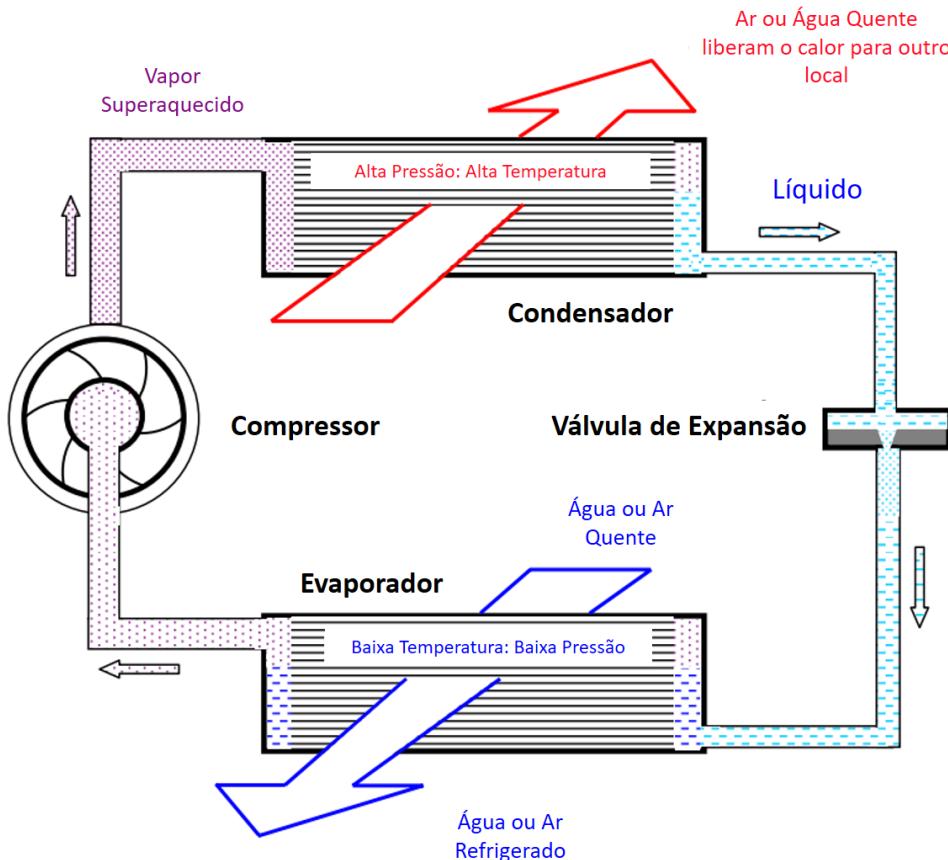
Fonte: Alvarez, 2021

5.2.5. Fluido Refrigerante

Os fluidos refrigerantes “são substâncias empregadas como veículos térmicos na realização dos ciclos de refrigeração” (MATOS, 2004). Não existe um fluido refrigerante ideal para todas as aplicações, mas há algumas características principais que os definem como bons, como, por exemplo, não ser corrosivo, ter pequeno volume específico, não ser tóxico, ter um custo-benefício apropriado, não ser combustível ou explosivo nas condições de trabalho, condensar-se a pressões moderadas e evaporar-se a pressões acima da atmosférica.

Dentro do ciclo de refrigeração o fluido refrigerante absorve calor do local a ser resfriado, aumentando sua temperatura e vaporizando-se (no evaporador). Após esse processo ele recebe um aumento de pressão e, consequentemente temperatura, no compressor e vai para o condensador, onde libera o calor para um novo ambiente, diminuindo sua temperatura e tornando-se líquido novamente. Por fim, como ele ainda é um líquido com alta pressão, a válvula de expansão faz com que essa pressão diminua e o ciclo continue (Figura 18).

Figura 18 - Componentes de um Sistema de Refrigeração



Fonte: McPherson, 2018

Segundo Alvarez (2021), existem 3 tipos de fluidos refrigerantes e 2 misturas, sendo eles:

- Clorofluorcarbonetos ou clorofluorcarbono (CFC): compostos formados pelos elementos Cloro, Flúor e Carbono;
- Hidroclorofluorcarboneto ou hidroclorofluorcarbonos (HCFC): neste tipo, alguns átomos de cloro são substituídos por hidrogênio. Observa-se que atualmente tanto os HCFCs, quanto os CFCs são proibidos em vários países e vêm sendo substituídos pelos hidrofluorcarbonetos, devido ao seu efeito danoso à camada de ozônio;
- Hidrofluorcarbonetos ou hidrofluorcarbonos (HFC): não há mais átomos de cloro, todos são substituídos por átomos de hidrogênio.
- Mistura azeotrópica: mistura de fluidos refrigerantes que se comporta como uma molécula única e com propriedades diferentes das de cada um dos seus constituintes.

- Mistura não azeotrópica: mistura de fluidos refrigerantes que não se comporta como uma molécula única e sim como mistura binária.

O nome de cada fluido refrigerante é iniciado pela letra R e seguido de três números, sendo que o significado do primeiro é o número de átomos de carbono presente na molécula, o segundo o número de átomos de hidrogênio o terceiro o número de átomos de flúor. Suas embalagens também recebem cores específicas conforme vemos na Figura 19.

Figura 19 - Embalagens de Fluidos Refrigerantes



Fonte: Alvarez, 2021

5.3. Normas brasileiras

Quando se fala em condições de trabalho no Brasil, as normas que as regem e delimitam são as Normas Regulamentadoras (NR), disposições complementares ao Capítulo V (Da Segurança e da Medicina do Trabalho) do Título II da Consolidação das Leis do Trabalho (CLT), com redação dada pela Lei nº 6.514, de 22 de dezembro de 1977. Essas normas consistem em obrigações, direitos e deveres a serem cumpridos por empregadores e trabalhadores com o objetivo de garantir trabalho seguro e sadio, prevenindo a ocorrência de doenças e acidentes de trabalho (BRASIL, 2018). A elaboração e a revisão das NRs são realizadas atualmente pela Secretaria Especial de Previdência e Trabalho (SEPRT) do Ministério do Trabalho e Previdência, adotando o sistema tripartite paritário por meio de grupos e comissões constituídas por representantes do governo, de empregadores e de trabalhadores.

Em se tratando de mineração temos as Normas Reguladoras de Mineração (NRM), reguladas pela Agência Nacional de Mineração (ANM), que juntamente com as NR-15 (“Atividades e Operações insalubres”) e a NR-22 (“Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração”), visam a busca permanente da segurança e saúde dos trabalhadores nas minerações. Suas aplicações se dão em toda a extensão dos processos de mineração, desde pesquisa mineral e beneficiamento mineral até lavra a céu aberto e subterrânea (BRASIL, 2002).

Tendo em vista os objetivos deste trabalho, observou-se que a norma específica de mineração (NR-22) não apresenta nenhuma regulamentação ou indicação específica sobre o assunto de refrigeração de minas, há apenas algumas citações sobre ventilação e controle de temperatura. Enquanto isso, na norma que trata de atividades e operações insalubres (NR-15) há uma citação da Norma de Higiene Ocupacional 06 (NHO), que avalia a exposição ocupacional ao calor.

A NHO-06 é uma norma elaborada pela FUNDACENTRO com o objetivo de “estabelecer critérios e procedimentos para avaliação da exposição ocupacional ao calor que implique sobrecarga térmica ao trabalhador, resultando em risco potencial de dano à sua saúde” (FUNDACENTRO, 2017). Essa norma passou a ser obrigatória após a atualização do Anexo 3 da NR-15 em 2019 e descreve como devem ser calculadas as temperaturas dos ambientes (Figura 31 presente no ANEXO A), quais equipamentos devem utilizados nessas medições (Figura 20) e quais as medidas preventivas e corretivas devem ser adotadas. O critério de avaliação da exposição ocupacional ao calor adotado tem por base o Índice de Bulbo Úmido de Globo (IBUTG) relacionado à taxa metabólica relativa à atividade física exercida pelo trabalhado.

Figura 20 - Termômetro de globo.



Fonte: NHO 06, 2017

5.4. Estudos de caso

5.4.1. Estudo de Caso 1 – *Gauteng, África do Sul*.

Mponeng é uma mina de ouro localizada em *Gauteng*, na África do Sul e considerada a mina mais profunda do mundo, atingindo uma profundidade superior a 4 quilômetros. O método de lavra adotado é o “*Sequential Grid Mining*”, um método variante do método de lavra por subníveis com perfurações longas (ZHU; ZHAO; WESTMAN, 2021).

A 3,5 quilômetros de profundidade, a temperatura de rocha local pode chegar a 54,5°C. Sob essas condições, seria impossível para qualquer ser humano o trabalho em subsolo. A mina conta, portanto, atualmente com um sistema de refrigeração de 100MW de capacidade, reduzindo a temperatura ambiente até 28°C (temperatura de bulbo úmido) (HOWDEN GROUP LIMITED, 2020).

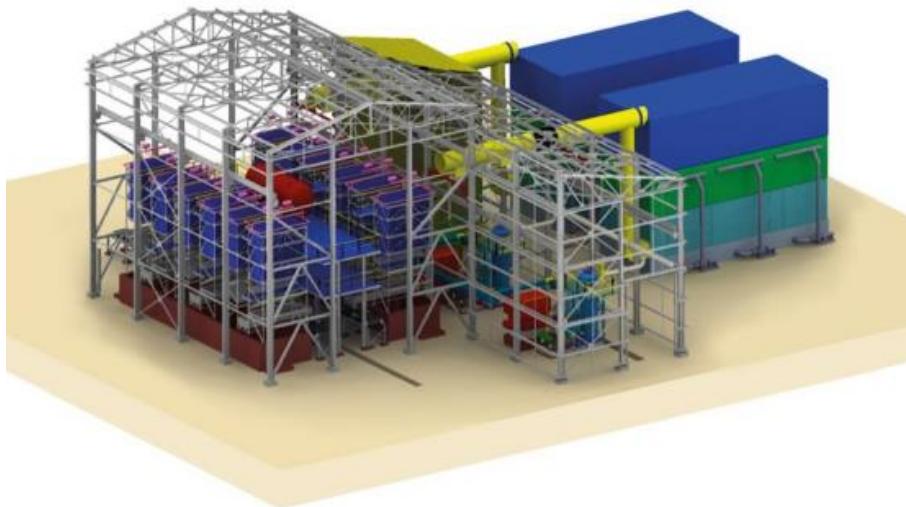
Em 2009 a *AngloGold Ashanti* percebeu que para continuar com a produção de ouro em valores praticáveis, seria necessário aprofundar ainda mais a mina e contratou a empresa *Howden* para realizar um estudo de qual método seria o ideal para o resfriamento de locais tão profundos.

Com a fase 1 do projeto, a *Howden* determinou que o aprofundamento da mina exigiria um aumento de 40MW na capacidade de refrigeração. A partir disso foi solicitado que a empresa realizasse a primeira etapa de expansão (10MW).

Após muitos estudos e devido às altas profundidades, a empresa concluiu que o sistema que melhor supriria a ventilação era a utilização de blocos de gelo sólido (Figura 21).

A taxa de 1 kg de gelo por segundo tem a mesma eficiência que uma taxa de 5 litros de água por segundo, o que proporciona 70 a 80% de economia nos custos de bombeamento.

Figura 21 - Local para fabricação de blocos de gelo



Fonte: Howden Group Limited, 2020

A Tabela 2 nos mostra a comparação entre a utilização do gelo e da água para esse caso.

Tabela 2 - Comparaçao entre Resfriamento por blocos de gelo e água

Informações	Unidade	Bloco de Gelo	Água
Temperatura da fonte de água resfriada	°C	-	6
Fração da massa de gelo	%	1	-
Fluxo de massa do fluido (fluxo de massa do gelo ou da água resfriada)	Kg/s	30,16	157,44
Custo operacional anual da bomba de água de retorno	USD/ano	1.056.781	5.516.775

Fonte: Howden Group Limited, 2020 – adaptado

Com essa descrição do estudo nota-se que o sistema utilizado é o de Armazenamento de Gelo (*Ice Storage*), com a adaptação de o gelo ser produzido e não proveniente de locais da própria mina que congelaram.

5.4.2. Estudo de Caso 2 – *Limpopo*, África do Sul.

Uma das maiores minerações de cobre do mundo está localizada em *Limpopo*, na África do Sul e pertence a *Palabora Mining Company*. Após a lavra a céu aberto ter alcançado sua profundidade econômica final em 2004 (Figura 22), há o início da exploração pelo método de lavra subterrânea Desabamento por Blocos (*Block Caving*) e já em maio de 2005 a mina atingia marcas de 30.000 toneladas por dia e profundidades de 1.200 metros.

Figura 22 - Mina de Palabora vista de cima em 2019



Fonte: Marx et al., 2020

Com a intenção de ampliar a produção de 10 a 20% a empresa decidiu expandir a mina subterrânea e com isso, o sistema de ventilação e de refrigeração também sofreram alterações.

Esses sistemas deviam considerar principalmente 4 áreas, sendo elas a produção, a área do transportador de correia, a área dos britadores e a oficina.

Para atender a esses requisitos um estudo com confiabilidade de $\pm 30\%$ em relação aos gastos foi realizado. Ele apresenta 5 diferentes cenários descritos na Tabela 3.

No estudo, no entanto, não são informadas as previsões de redução de temperatura após a instalação de cada sistema de refrigeração.

Tabela 3 - Comparaçao entre as opções de Sistemas de Refrigeração

Opção	Fluxo de Água (l/s)	Potência Absorvida pelo Sistema (MWe)
1a) Sistema de refrigeração em superfície, integrado ao sistema de resfriamento subterrâneo de baixa pressão	325	10,9
1b) Sistema de refrigeração em superfície, integrado ao sistema de resfriamento subterrâneo de alta pressão	325	5,5
2a) Sistema de refrigeração em superfície, integrado ao sistema de resfriamento subterrâneo de baixa pressão (via Pelton)	325	6,5
2b) Sistema de refrigeração em superfície, integrado ao sistema de resfriamento subterrâneo de baixa pressão (via Alimentador com três câmaras)	325	6,1
3) Sistema de refrigeração subterrânea, integrado a um sistema de refrigeração subterrâneo de baixa pressão	250	5,1

Fonte: Elaboração própria

Para uma avaliação inicial dos custos foi feito um levantamento com os custos de todos os equipamentos necessários em cada opção e o custo com energia Tabela 4.

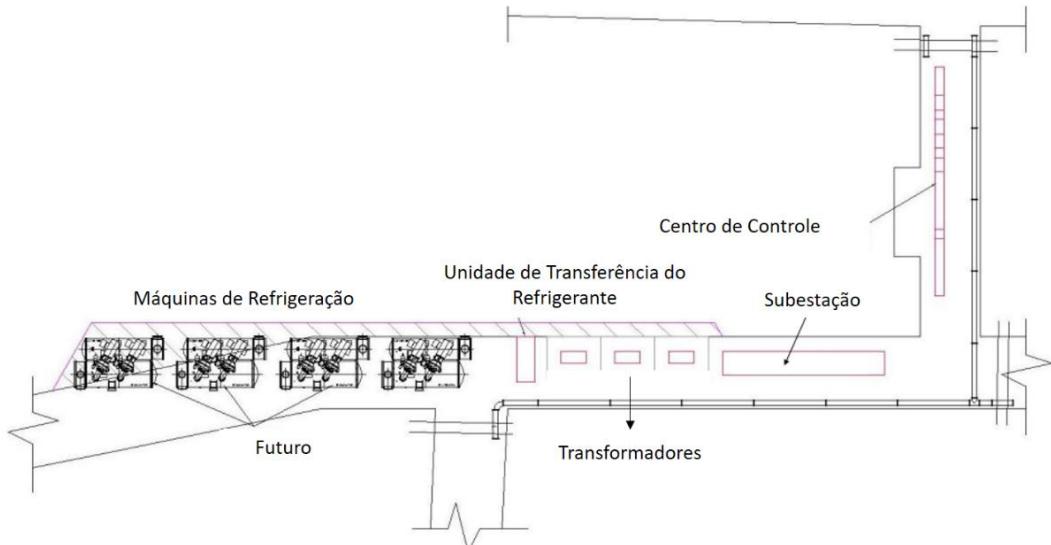
Tabela 4 - Custos com cada opção disponível

Opção	Custo com Equipamentos (US\$ MM)	Custo com Potência Absorvida pelo Sistema (US\$ MM)	Custo Total (US\$ MM)
1a	22,26	38,20	60,46
1b	26,48	34,52	61,00
2a	25,40	34,90	60,30
2b	23,17	32,09	55,26
3	16,86	24,31	41,17

Fonte: Elaboração própria

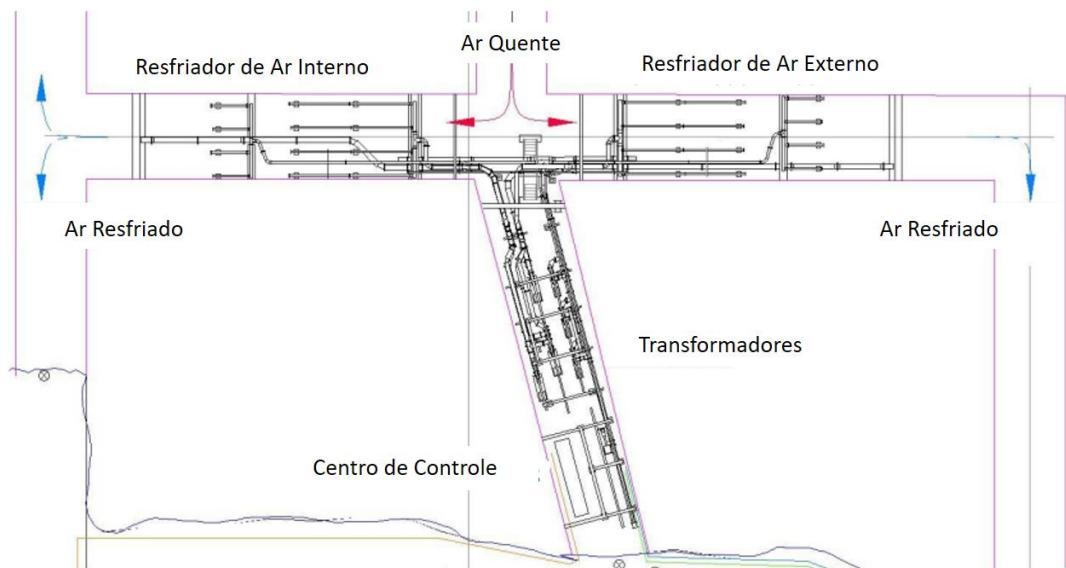
Considerando o custo total, a opção 3 por apresentar o menor valor de todos, foi escolhida para um primeiro projeto. Sua disposição pode ser encontrada na Figura 23 e na Figura 24.

Figura 23 - Arranjo da Planta de Refrigeração subterrânea



Fonte: Marx et al., 2020

Figura 24 - Arranjo do Resfriador de Ar em superfície



Fonte: Marx et al., 2020

Neste caso identifica-se que as 5 opções consideradas para a expansão dos sistemas são baseadas nos sistemas de resfriamento de ar na superfície (*Surface Bulk Air Cooling*) e em subsolo (*Underground Bulk Air Cooling*).

5.5. Levantamento de dados de minerações brasileiras com Sistema de Refrigeração

Os formulários enviados buscaram levantar dados de profundidade, método de lavra, temperatura (média) antes e depois do sistema de refrigeração, quais equipamentos e qual tipo de sistema de refrigeração utilizado. As respostas obtidas para as seis (6) perguntas elaboradas são apresentadas a seguir (Tabela 5, Tabela 6, Tabela 7, Tabela 8, Tabela 9 e Tabela 10).

Tabela 5 - Respostas à primeira pergunta

Pergunta: Qual é o método de lavra utilizado?	Resposta
Mineração Caraíba	VRM (Vertical Retreat Mining).
Mineração Cuiabá	Cut and Fill e Sublevel Stoping.
Mineração Serra Grande	Sublevel Stoping e Cut and Fill, a depender do nível e do corpo trabalho.
Mineração Taquari-Vassouras	Camaras e pilares.

Fonte: Elaboração própria

Tabela 6 - Respostas à segunda pergunta

Pergunta: Qual é a profundidade da mina?	Resposta
Mineração Caraíba	1470 metros.
Mineração Cuiabá	1400 metros, porém há operação em vários níveis da mina.
Mineração Serra Grande	Aproximadamente 1100 metros no nível mais profundo, porém a mina é operada em 3 corpos principais que estão a profundidades diferentes.
Mineração Taquari-Vassouras	Máximo 580 metros (lavra atual).

Fonte: Elaboração própria

Tabela 7 - Respostas à terceira pergunta

Pergunta: Qual era a temperatura média (IBUTG, Tef, Tbs e/ou Tbu em °C) na(s) frente(s) de serviço antes de implementar o sistema de refrigeração?	Resposta
Mineração Caraíba	35° IBUTG. Nas frentes de desenvolvimento nos níveis mais profundos, sem o sistema de ventilação, a temperatura do ambiente passa dos 40°C (Tbs), pois devido ao efeito de autocompressão até mesmo o ar se torna fonte de calor e o gradiente geotérmico da rocha é elevado.
Mineração Cuiabá	Sem refrigeração, as frentes mais profundas podem chegar a temperaturas próximas dos 40°C (Tbs), principalmente se considerado os equipamentos a diesel operando.
Mineração Serra Grande	
Mineração Taquari-Vassouras	36,2° IBUTG

Fonte: Elaboração própria

Tabela 8 - Respostas à quarta pergunta

Pergunta: Qual é o sistema de refrigeração utilizado?	Resposta
Mineração Caraíba	<i>Surface Bulk Air Cooler Systems.</i> Usa-se uma câmara de refrigeração com aspersor de água gelada que resfria o ar que será enviado para mina. Tal ar é direcionado ao nível 11 da mina e distribuído pelas rampas.
Mineração Cuiabá	São utilizados módulos <i>Agrekko</i> , que são máquinas alugadas e temporárias utilizadas por terem uma viabilidade econômica melhor devido ao <i>LOM</i> da mina.
Mineração Serra Grande	São utilizados módulos <i>Agrekko</i> , que são máquinas alugadas e temporárias utilizadas por terem uma viabilidade econômica melhor devido ao <i>LOM</i> da mina.
Mineração Taquari-Vassouras	Sistema com bombas de evaporador, com planta de máquinas de amônia <i>frick</i> e máquinas de refrigeração R134A.

Fonte: Elaboração própria

Tabela 9 - Respostas à quinta pergunta

Pergunta: Quais são os equipamentos que compõem o sistema de refrigeração?	Resposta
Mineração Caraíba	CCT (torre de resfriamento); 02 unidades de compressores <i>Chiller</i> com capacidade de 3MWR (cada); BAC (<i>Bulk Air Cooler</i>).
Mineração Cuiabá	Planta de refrigeração com <i>spray chamber</i> e ventiladores principais e auxiliares.
Mineração Serra Grande	3 módulos <i>Agrekko</i> .
Mineração Taquari-Vassouras	Ventiladores primários, compressores, torre de arrefecimento, bomba de transferência.

Fonte: Elaboração própria

Tabela 10 - Respostas à sexta pergunta

Pergunta: Qual é a temperatura média de operação atual (IBUTG, Tef, Tbs e/ou Tbu em °C) (considerando o sistema de refrigeração)?	Resposta
Mineração Caraíba	28° IBUTG.
Mineração Cuiabá	Nas frentes de trabalho mais profundas, há temperaturas próxima dos 30°C (Tbs), porém os operadores dos equipamentos utilizam equipamentos cabinados e com ar condicionado, devido as condições de trabalho exigidas pela NR-22 e NRM-06. Há estudos em andamento para expansão do sistema de refrigeração devido ao aprofundamento da mina.
Mineração Serra Grande	Nos níveis mais profundos, em momentos onde não há equipamentos operando, a temperatura é em média 24-26°C (Tbs), considerando o bom estado do sistema de ventilação.
Mineração Taquari-Vassouras	29,7° IBUTG com média aos 6 painéis de lavra existentes.

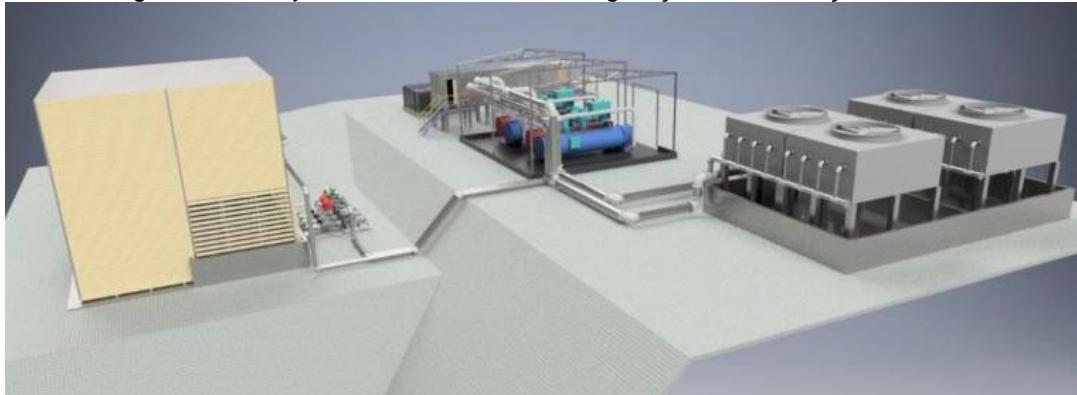
Fonte: Elaboração própria

Analizando as respostas enviadas pelas empresas, pode-se verificar que as profundidades variam desde 500 até quase 1500 metros, cada mina utiliza um método de lavra e um sistema de refrigeração com componentes diferentes.

De acordo com a resposta do questionário, na mineração Caraíba temos a utilização do sistema *Surface Bulk Air Cooling* (Figura 25). Na mineração Cuiabá temos também o método de *Surface Bulk Air Cooling* como sistema de refrigeração central (Figura 26) e auxiliado por equipamentos com sistema de refrigeração específico (*Micro-Climate Cooling*) para garantir o conforto térmico do trabalhador. Na mineração Serra Grande temos a utilização de módulos

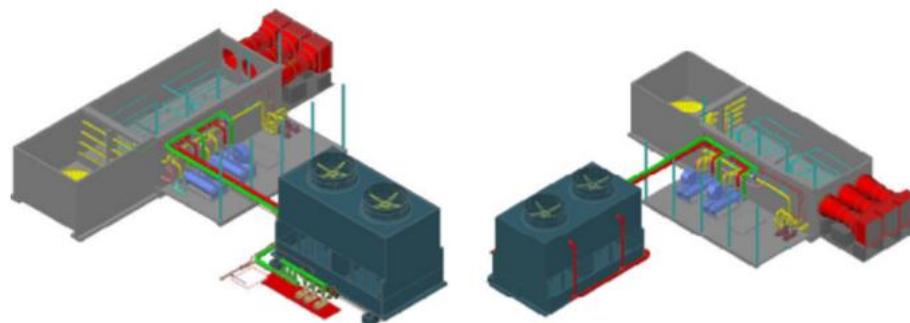
Agrekkko (Figura 27), que utilizam o método de *Underground Bulk Air Cooling* (com resfriadores subterrâneos conectados ao ar da superfície) e, por fim, na mineração Taquari-Vassouras temos o método *Surface Bulk Air Cooling* (equipamentos em superfície que utilizam refrigerantes como o hidrofluorcarboneto R134a) e, segundo Brasil (2020), há testes para a instalação de climatizadores móveis em algumas regiões da mina, conforme Figura 28.

Figura 25 – Projeto 3D do sistema de refrigeração da mineração Caraíba



Fonte: In the Mine, 2021

Figura 26 - Projeto 3D do sistema de refrigeração da mineração Cuiabá



Fonte: Oliveira, 2010

Figura 27 - Módulos Agrekko



Fonte: Agrekko, 2021

Figura 28 - Climatizador móvel instalado junto ao ventilador secundário



Fonte: Brasil, 2020

Com relação às temperaturas, percebe-se que os sistemas de refrigeração atualmente empregados proporcionam uma redução em média de 20% (IBUTG) na mina Caraíba, 25% (Tbs) na mina Cuiabá, 35% (Tbs) na mina Serra Grande e 18% (IBUTG) na mina Taquari-Vassouras em relação às temperaturas iniciais. Os equipamentos utilizados são todos diferentes entre si e mostram que a mesma função pode ser desempenhada por diferentes maquinários. Vale ressaltar que cada mineração realizou um projeto para o desenvolvimento da mina a longo prazo e esses sistemas ainda poderão sofrer alterações e expansões.

Um comentário adicional deixado pelo profissional da mina Taquari-Vassouras foi de que o projeto de refrigeração feito foi dividido em duas partes, a primeira gerou uma redução de 7 °C IBUTG no circuito de ventilação e a segunda etapa, ainda em construção e prevista para abril/2022, calcula uma redução de 10° C IBUTG nas frentes de operação.

Um outro exemplo de como os projetos sofrem alterações ao longo do tempo é a Mina Cuiabá. Segundo Costa (2019), a capacidade nominal do sistema é de aspergir água a 3,7 °C (Tbs), fazendo com que o ar seja resfriado a até 11 °C Tbs (temperatura de entrada do ar seria 21 °C Tbs), entretanto a operação da mina acontece com a temperatura da água aspergida de 6,0 °C Tbs e a temperatura do ar direcionado à mina de 13,7 °C Tbs. Esse sistema já atende as especificações atuais da mineração, porém com o aprofundamento da mina, uma expansão do sistema será necessária.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho conclui que os sistemas de refrigeração utilizados nas minas subterrâneas podem ser centrais, descentralizados ou específicos, e que são classificados nos seguintes tipos: *Surface Bulk Air Cooling, Underground Bulk Air Cooling, Ice Storage, Spot Cooling e Micro-Climate Cooling*.

Esses sistemas são compostos por quatro equipamentos essenciais, sendo eles o evaporador, o compressor, o condensador e a válvula de expansão. Cada um desses equipamentos tem sua função dentro do sistema e permitem que ele seja aplicado as mais diversas áreas.

O sistema de refrigeração aplicado à mineração subterrânea viabiliza a expansão de minas subterrâneas, proporciona conforto térmico aos trabalhadores e permite que as condições de trabalho sejam adequadas, entretanto seus gastos são altos e necessitam de um alto investimento.

No Brasil as normas (NR, NRM e NHO) determinam as condições (temperatura, velocidade do ar, entre outras) que as minas subterrâneas devem obedecer, fazendo com que os projetos dos sistemas de refrigeração sejam feitos para atender essas exigências e possuam diferentes *layouts*, tamanhos e utilizações de equipamentos.

Através dos dados levantados percebe-se que no Brasil o tipo de sistema de

refrigeração mais utilizado nas minas atualmente é o *Surface Bulk Air Cooling*. As minerações possuem também diferentes formas de avaliar a temperatura ambiente, mas todas procuram atender aos requisitos das normas vigentes e permitem condicionar o ambiente para o trabalhador nas circunstâncias atuais de cada mina, entretanto, em caso de aprofundamento e expansão, um novo projeto de refrigeração é necessário.

7. REFERÊNCIAS

- AGREKKO. **Refrigeração de ar subterrânea para mina de ouro.** Disponível em: <https://www.aggreko.com/pt-br/case-studies/mining/underground-cooling-at-gold-mine>. Acesso em: 10 nov. 2021.
- AGRICOLA, G. **De Re Metallica.** Translated by: Herbert C. Hoover and Lou H. Hoover. New York: Courier Corporation, 1950. 638 p.
- ALVAREZ, R. **Refrigeración Aplicada a Minería.** Workshop. In: II Simposio Internacional en Ventilación de Minas de Sudamérica. Mar. 2021, 205p.
- ASHRAE Standard 55-1992. **Thermal environment conditions for human occupancy.** ASHRAE, Atlanta. 2004.
- AYRES DA SILVA, A. L. M. **Notas de Aula. Disciplina PMI3221:** Ventilação de Minas, Túneis e Usinas, 2021.
- BARALDI, A. **Refrigeração de uma unidade de processamento de gás natural.** 2015. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/140468>. Acesso em: 15 jul. 2021.
- BRASIL, A. C. S. **Aplicação da metodologia DMAIC à gestão de processo de ventilação de mina.** 2020. 202 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/36028/1/Alisson%20Carvalho%20Santos%20Brasil_CPGEM_Defesa%20de%20disserta%C3%A7%C3%A3o_%28reposit%C3%B3rio%29.pdf. Acesso em: 05 nov. 2021
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral. Portaria nº 12, de 22 de Janeiro de 2002. Diário Oficial da União. 29 de

janeiro de 2002. Disponível em <https://anmlegis.datalegis.inf.br/action/ActionDatalegis.php?acao=detalharAtosArvore&link=S&tipo=POR&numeroAto=00000012&seqAto=000&valorAno=2002&orgao=DNPM/MME&codTipo=&desItem=&desItemFim=&nomeTitulo=>.

Acesso em: 21 de novembro de 2021.

BRASIL. Ministério do Trabalho. Altera a Norma Regulamentadora nº 15 (**NR-15**) – **Atividades e Operações Insalubres**. 19 de dezembro de 2018. 82p. Disponível em <https://www.pncq.org.br/uploads/2019/NR%2015%202018.pdf> Acesso em: 14 de maio de 2021.

BRAKE, D J.; FULKER, R. **The ventilation and refrigeration design for Australia's deepest and hottest underground operation: the Enterprise mine**. Proc MassMin 2000 611-621. Aust Inst Mining and Met. 2000. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/312624827_The_ventilation_and_refrigeration_design_for_Australia%27s_deepest_and_hottest_underground_operation_the_Enterprise_mine

COSTA, C. V. da. **Substituição de equipamentos a diesel por elétricos como alternativa para diminuir a vazão do Sistema de Ventilação**. 2019. 53 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2019.

CERDEIRA, J. P. C. **Ambiente térmico na atividade mineira subterrânea**. 2012. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestre em Engenharia de Minas e Geoambiente, Universidade do Porto, Porto, 2012. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/68381>. Acesso em: 15 set. 2021.

FUNDACENTRO. Norma de Higiene Ocupacional (**NHO 06 – Procedimento técnico: Avaliação da exposição ocupacional ao calor**). 2ed. – São Paulo: Fundacentro, 2017. Disponível em <http://www.norminha.net.br/Arquivos/Arquivos/NHO-06.pdf> Acesso em: 14 de maio de 2021.

GONZÁLEZ, A. del C. C. **Influência térmica de intrusões de diabásio nas camadas de carvão e rochas sedimentares encaixantes da jazida Santa Terezinha, Rio Grande do Sul**. 2015. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em:

<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/117426/000966706.pdf?sequence=1>. Acesso em: 20 set. 2021.

GRETH, A. et al. **A review of cooling system practices and their applicability to deep ad hot underground US mines**, 16th North American Mine Ventilation Symposium, Golden, CO, June 17-22, 2017, volume 11, pp. 1-9 Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/319598721_A_Review_of_Cooling_System_Practices_and_Their_Applicability_to_Deep_and_Hot_Underground_US_Mines

HARTMAN, H et al. **Mine Ventilation and Air Conditioning**. (3^a Ed). New York: John Wiley & Sons, 2012. 752 p.

HOWDEN GROUP LIMITED. **Refrigeração com gelo em cubos maximiza economia dos custos de operação**. Gauteng: Howden Group Limited, 2020. (Estudo de Caso, 2020).

IN THE MINE (Brasil). **Mineração Caraíba vai contar com tecnologia de refrigeração** Howden. 2021. Disponível em: <https://www.inthemine.com.br/site/mineracao-caraiba-vai-contar-com-tecnologia-de-refrigeracao-howden/>. Acesso em: 10 nov. 2021.

KAMYAR, A. et al. **Current Developments and Challenges of Underground Mine Ventilation and Cooling Methods**, em Naj Aziz and Bob Kininmonth (eds.), Proceedings of the 2016 Coal Operators' Conference, Mining Engineering, University of Wollongong, 18-20 February 2019

MARX, W. et. al. **Refrigeration and cooling system design – a case study**. Deep Mining 2012 — Y. Potvin (ed), Perth, p. 463-472, 2012.

MATOS, R. S. **Refrigeração e Climatização**. 248 p., 2004. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/GabrielPardo5/apostila-refrigeracao-82327918>>. Acesso em: 10 de outubro de 2021

MCPHERSON, M. J. **Subsurface Ventilation Engineering**. Berkeley: Mining Ventilation Services, Inc. 2018. 902 p.

OLIVEIRA, L. C. **Desafios no aprofundamento da mina de Cuiabá - refrigeração**. Sabará: S.I., 2010. Disponível em: <https://silo.tips/download/palavras-chave-refrigeracao-ambiental-energia-segurana>. Acesso em: 03 out. 2021.

OLIVEIRA, T. **O futuro está no subsolo**. In the Mine, São Paulo, XV, 2021, Nº90, p.22-24, mar. abr. 2021

SANDVIK AB. **DL432i EQUIPAMENTO DE PERFURAÇÃO DE FURO LONGO.** 2021. Apresenta características do equipamento. Disponível em <https://www.rocktechnology.sandvik/pt-br/produtos/equipamentos-de-perfura%C3%A7%C3%A3o-subterr%C3%A2nea-e-de-atirantamento/equipamentos-de-perfura%C3%A7%C3%A3o-de-furo-longo/equipamento-de-perfura%C3%A7%C3%A3o-de-furo-longo-dl432i/>. Acesso em 06 de novembro de 2021.

TEIXEIRA, M. B. **Assessing surface and underground cooling methods, coupled to efficient ventilation systems to improve the climatic conditions in deep and hot mines.** 2019. 83 f. Tese (Doutorado) - Curso de Master Of Science In Mining Engineering, University Of Nevada, Reno, 2019. Disponível em:

https://scholarworks.unr.edu/bitstream/handle/11714/5738/BandeiraTeixeira_unr_0139M_12868.pdf?isAllowed=y&sequence=1. Acesso em: 15 maio 2021.

VIEIRA, J. M. C.; SILVA, W. T.; AYRES DA SILVA, A. L. M. **Sistemas de Ventilação nas Minas Subterrâneas Brasileiras.** In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA USP, 29., São Paulo: Pró-Reitoria de Pesquisa da USP, 2021.

ZHU, Q.; ZHAO, X.; WESTMAN, E. **Review of the Evolution of Mining-Induced Stress and the Failure Characteristics of Surrounding Rock Based on Microseismic Tomography. Shock and Vibration**, v. 2021, 2021.

APÊNDICE A – Formulário digital enviado para as empresas

Abaixo é apresentado formulário digital enviado para as empresas.

Figura 29 - Formulário enviado para as empresas (parte 1)

Levantamento de dados de minerações brasileiras com sistema de refrigeração



Qual é o método de lavra utilizado?

Sua resposta

Qual é a profundidade da mina?

Sua resposta

Qual era a temperatura média (IBUTG, Tef, Tbs e/ou Tbu em °C) na(s) frente(s) de serviço antes de implementar o sistema de refrigeração?

Sua resposta

Qual é o sistema de refrigeração utilizado?

Sua resposta

Fonte: Elaboração própria

Figura 30 - Formulário enviado para as empresas (parte 2)

Quais são os equipamentos que compõem o sistema de refrigeração?

Sua resposta

Qual é a temperatura média de operação atual (IBUTG, Tef, Tbs e/ou Tbu em °C) (considerando o sistema de refrigeração)?

Sua resposta

Comentários adicionais (opcional)

Sua resposta

Enviar Página 1 de 1 Limpar formulário

Nunca envie senhas pelo Formulários Google.

Este formulário foi criado em Universidade de São Paulo. [Denunciar abuso](#)

Google Formulários

Fonte: Elaboração própria

ANEXO A – Critério de avaliação presente na norma brasileira

Abaixo é apresentada parte da Norma de Higiene Ocupacional “NHO-06 – Procedimento técnico: Avaliação da exposição ocupacional ao calor” (FUNDACENTRO, 2017).

Figura 31 - Parte da NHO-06

5. Critério de avaliação da exposição ocupacional ao calor

O critério de avaliação da exposição ocupacional ao calor adotado pela presente norma tem por base o Índice de Bulbo Úmido Termômetro de Globo (IBUTG) relacionado à Taxa Metabólica (M).

5.1 IBUTG

O IBUTG é calculado por meio das equações 5.1 ou 5.2:

- a) Para ambientes internos ou para ambientes externos sem carga solar direta

$$\text{IBUTG} = 0,7 \text{ tbn} + 0,3 \text{ tg} \quad [5.1]$$

- b) Para ambientes externos com carga solar direta¹

$$\text{IBUTG} = 0,7 \text{ tbn} + 0,2 \text{ tg} + 0,1 \text{ tbs} \quad [5.2]$$

sendo:

tbn = temperatura de bulbo úmido natural em °C

tg = temperatura de globo em °C

tbs = temperatura de bulbo seco (temperatura do ar) em °C

Fonte: FUNDACENTRO, 2017