



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



MARCUS VINÍCIUS CASTRO BENFENATTI

**APROVEITAMENTO DO POTENCIAL GEOTÉRMICO EM MINA
SUBTERRÂNEA: Um estudo de revisão bibliográfica**

OURO PRETO - MG
2017

MARCUS VINÍCIUS CASTRO BENFENATTI

mvbenfenatti@gmail.com

**APROVEITAMENTO DO POTENCIAL GEOTÉRMICO EM MINA
SUBTERRÂNEA: Um estudo de revisão bibliográfica**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Minas.

Professor orientador: Doutor. José Margarida da Silva

**OURO PRETO – MG
2017**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 24 dias do mês de março de 2017, às 13h45min, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DEMIN/EM, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado **“APROVEITAMENTO DO POTENCIAL GEOTÉRMICO EM MINA SUBTERRÂNEA”**, pelo aluno **Marcus Vinícius Castro Benfenatti**, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof. Dr. José Margarida da Silva (Orientador)**, **Prof. Dr. Hernani Mota de Lima** e **Engº de Minas Syro Gusthavo Lacerda**.

Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela **APROVAÇÃO** do candidato, com a nota **9,0** concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

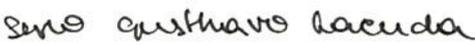
O aluno fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após a entrega dos exemplares definitivos (Cd e cópia impressa) da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

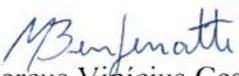
Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pelo discente.

Ouro Preto, 24 de março de 2017.


Prof. Dr. José Margarida da Silva
Presidente da Comissão Avaliadora e Professor Orientador


Prof. Dr. Hernani Mota de Lima
Membro da Comissão Avaliadora


Engº de Minas Syro Gusthavo Lacerda
Membro da Comissão Avaliadora


Marcus Vinícius Castro Benfenatti


Prof. Ms.C. José Fernando Miranda
Professor responsável pela Disciplina Min 491 – Trabalho de Conclusão de Curso

A minha família e aos meus amigos pelo apoio incondicional.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a minha família e amigos por todo apoio e suporte durante toda essa jornada. A orientação, ajuda e paciência do meu orientador professor José Margarida e do meu amigo Henrique “Carneiro”. Agradeço também a Ouro Preto, a UFOP e República Peripatus pelos melhores anos da minha vida.

Veni, vidi, vici.

Júlio Cesar

RESUMO

O aumento da preocupação com o meio ambiente vem levando setores industriais a uma crescente busca por uma produção de recursos mais limpa e sustentável. Assim o setor minerário, que é visto como grande impactante do meio ambiente, tem cada vez mais investido em técnicas para melhor aproveitamento dos recursos e, conseqüentemente, reduzir dos custos operacionais. Neste contexto surge a ideia de se utilizar escavações de minas subterrâneas para a produção de energia geotérmica, substituindo fontes convencionais de energia por uma fonte renovável, que além de reduzir custos operacionais de condicionamento de mina, pode também fazer parte do plano de fechamento de mina, gerando um novo uso para a mesma. Tal ideia vem sendo pesquisada e implementada em alguns países como Canadá, Alemanha e Holanda, incentivados pelo aumento da demanda energética mundial e pela preocupação com a redução da emissão de gases responsáveis pelo efeito estufa como o dióxido de carbono (CO₂). Este trabalho tem com ideia principal introduzir o assunto e conceitos básicos sobre o aproveitamento de tal energia proveniente da dissipação de calor do centro da Terra, fazendo uma breve análise dos tipos de sistemas de aproveitamento geotérmicos bem como as possíveis aplicações, como o fornecimento desta energia para região no entorno do empreendimento, onde ajudaria a reduzir os impactos socioeconômicos gerados com o fim das atividades minerárias. Também é feita uma breve análise da redução dos impactos ambientais gerados pelo empreendimento com a contrapartida da produção de energia limpa.

Palavras-chave: Mina subterrânea, Grau geotérmico, Aproveitamento geotérmico, Fechamento de mina, Reutilização de escavação

ABSTRACT

The increased concern about the environment has led industrial sectors to a growing search for cleaner and more sustainable resource production. Thus, the mining sector, which is seen as major impact on the environment, has increasingly invested in techniques to better use resources and, consequently, reduce operating costs. In this context, the idea to use underground mine excavations for the production of geothermal energy, replacing conventional sources of energy with a renewable source, which, in addition to reducing operating costs of mine conditioning, may also be part of the mine closure plan, generating a new use for it. This idea has been researched and implemented in some countries such as Canada, Germany and the Netherlands, encouraged by the increase in the world energy demand and the concern about reducing the emission of greenhouse gases such as carbon dioxide (CO₂). This work has as main idea to introduce the subject and basic concepts about the use of such energy from the heat dissipation of the center of the earth, making a brief analysis of the types of geothermal systems, as well as the possible applications such as the supply of this energy to the region around the enterprise, where it would help reduce the socioeconomic impacts generated by the end of mining activities. A succinct analysis of the reduction of the environmental impacts generated by the project with the counterpart of clean energy production is also made.

Key-words: *Underground mine, Geothermal grade, Geothermal utilization, Mine closure, Excavation reuse.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Vista geral das instalações em superfície da Mina de níquel Rim South.	13
Figura 1.2 - Evolução do uso mundial de energia geotermal.	14
Figura 2.1 - Oferta interna de energia no Brasil - 2015 (%).	18
Figura 2.2 - Oferta interna de energia elétrica no Brasil - 2015 (%).	19
Figura 2.3 - Representação da dinâmica interna da Terra	20
Figura 2.4 - Distribuição do potencial geotérmico da Terra	21
Figura 2.5 - Distribuição do potencial energético de recurso geotérmico na América do Sul	22
Figura 2.6 - Entrada da Mina Cabaçal após recuperação	25
Figura 2.7 - Barragem de rejeitos da Mina Cabaçal após recuperação	25
Figura 2.8 - Trolley de visitação da Mina de Passagem.	26
Figura 2.9 - Escada de acesso ao lago para mergulhadores na Mina de Passagem.	27
Figura 2.10 - Simplificação da dinâmica interna de uma região de alto potencial geotérmico.	28
Figura 2.11 - Sistema de aproveitamento geotérmico simplificado	30
Figura 2.12 - Sistema de ciclo fechado horizontal	33
Figura 2.13 - Sistema de ciclo fechado vertical	33
Figura 2.14 - Sistema vertical fechado simplificado	34
Figura 2.15 - Possíveis configurações para sistemas Fechados horizontais em série e paralelo.	35
Figura 2.16 - Sistema horizontal fechado slinky	36
Figura 2.17 - Sistema fechado misto	37
Figura 2.18 - Sistema de ciclo aberto	38
Figura 2.19 - Poços de produção e injeção.	39
Figura 2.20 - Sistema aberto de coluna de pé (Standing Column)	40
Figura 2.21 - Sistema aberto de aquecimento de residências	41
Figura 2.22 - Sistema geotérmico em mina subterrânea	42
Figura 2.23 - Projeto Springhill, Nova Escócia, Canada.	43
Figura 2.24 - Esquema geométrico simplificado das galerias e poços	44
Figura 2.25 - Gráfico de relação entre a temperatura da água em Celsius pela distância em metros percorrida por ela em uma galeria	45
Figura 2.26 - Gráficos de relação entre a taxa de fluxo de água em metros cúbicos por hora pelo ganho de temperatura e ganho energético em quilowatt.	45
Figura 2.27 - Gráficos de relação entre energia termal obtida em quilowatt pelo tempo em anos, onde m é o número de meses se funcionamento de sistema.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Comparação dos dados obtidos da Mina I com sistemas convencionais.	47
Tabela 2.2 - Comparação dos dados obtidos da Mina II com sistemas convencionais.	47
Tabela 2.3 - Comparação dos dados obtidos da Mina III com sistemas convencionais.	48
Tabela 2.4 - Comparação dos dados obtidos da Mina IV com sistemas convencionais.	48
Tabela 2.5 - Comparação dos dados obtidos da Mina V com sistemas convencionais.	49
Tabela 2.6 - Comparação dos dados obtidos da Mina VI com sistemas convencionais.	50
Tabela 2.7 - Comparação dos dados obtidos da Mina VII com sistemas convencionais.	50
Tabela 2.8 - Comparação dos dados obtidos da Mina VIII com sistemas convencionais.	51
Tabela 2.9 - Comparação dos dados obtidos da Mina IX com sistemas convencionais.	51
Tabela 2.10 - Comparação dos dados obtidos da Mina X com sistemas convencionais.	52
Tabela 2.11 - Comparação dos dados obtidos da Mina XI com sistemas convencionais.	52
Tabela 2.12 - Comparação dos dados obtidos da Mina XII com sistemas convencionais.	53
Tabela 2.13 - Resumo final das análises das 12 minas em comparação a sistemas elétricos.	53

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Formulação do Problema.....	10
1.2	Justificativa.....	12
1.3	Objetivos.....	15
1.3.1	Objetivo Geral	15
1.3.2	Objetivos específicos	15
1.4	Metodologia.....	15
1.5	Estrutura do trabalho	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Energias renováveis	17
2.1.1	Energia Geotérmica	19
2.2	Mina Subterrânea.....	23
2.3	Sistemas de Aproveitamento do Potencial Geotérmico	28
2.3.1	Usos diretos	30
2.4	Análise do uso de Galerias de Minas Subterrâneas como Fonte Geotérmica	41
2.5	Discussões	54
3	CONCLUSÕES.....	56
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

A extração mineral é uma prática essencial para o desenvolvimento humano de modo que é impossível viver sem ela. Com esta exploração de bens minerais temos o desenvolvimento econômico e social do país que passa a produzir matérias primas essenciais para a sobrevivência humana e ainda gerando um aumento de arrecadação com impostos e taxas pagas pelas mineradoras, como a CFEM (Compensação Financeira pela Extração de Recursos Minerais). Esta taxa é dividida entre União, Estados e municípios mineradores, além do grande desenvolvimento regional com a criação de novos postos de empregos e melhoria na infraestrutura local. Porém, a mineração também é responsável pela geração de passivos ambientais, assim impactando diretamente a natureza, acabando por tornar o setor mal visto pela sociedade de forma geral.

Então cabe às mineradoras buscar modos de extrair tais bens com o menor impacto possível e também se preocupar em prover um retorno positivo à sociedade impactada, direta ou indiretamente, por tal empreendimento mesmo depois do encerramento de suas atividades, pois com este temos grandes impactos econômicos, sociais e ambientais associados.

Assim, o uso do potencial geotérmico de minas subterrâneas pode ser uma opção para o fechamento de mina que ajuda a reduzir custos do monitoramento contínuo de minas abandonadas com uma forma sustentável de se encerrar as atividades da mina. Estudiosos da McGill University, do Canadá, afirmam que a cada quilômetro de uma mina subterrânea típica pode-se produzir cerca de 150 kW de calor, o suficiente para aquecer de 5 a 10 casas canadenses e algumas comunidades já possuem este sistema em funcionamento.

Essas aplicações acabam por impulsionar o desenvolvimento de um modelo geral que poderia ser usado para análise do potencial geotérmico de outras minas, segundo Michel (2009) as minas do Canadá têm um potencial energético de 67.000 MWh/ano. Em um estudo das minas antigas de ouro da região de Timmins (Canadá) foi descoberto um potencial energético de cerca de 28.000 MWh/ano.

No mundo existem cerca de 1 milhão de minas abandonadas, segundo Hall *et al* (2011), e no pós-abandono, usualmente as minas são inundadas pela elevação natural do nível de água ou também podem ser artificialmente inundadas. A uma profundidade de 780 m, a água está

naturalmente aquecida a cerca de 30 a 35° C, o que pode não ser interessante para geração de energia elétrica, mas é suficiente para um edifício ficar bem aquecido se a água for circulada entre níveis do mesmo. Além disso o calor geotérmico pode ajudar a reduzir a energia gasta para aquecer a água a uma temperatura de uso doméstico como em um chuveiro.

Desta forma, este trabalho é um estudo de revisão bibliográfica a respeito da possibilidade de minimizar impactos ambientais, econômicos e sociais em comunidades diretamente influenciadas pelo empreendimento. Também futuramente pode tornar-se uma opção para o plano de fechamento de mina subterrânea, em que esta pode chegar a tornar-se um gerador auxiliar de uma matriz energética principal, assim tornando o empreendimento mais autossustentável com o aproveitamento do potencial geotérmico da Terra que é um recurso dito renovável.

Segundo Barbier (1997), a cada quilômetro de profundidade temos um aumento de 30°C na temperatura do solo, cujo calor pode ser utilizado como gerador de energia. O maior investimento para o aproveitamento energético é a perfuração do solo para a construção dos poços de produção e injeção que, no caso das minas subterrâneas, já se encontra executado pela extração mineral, sendo assim viabilizando o uso das galerias de maior potencial geotérmico, utilizando-as com a finalidade de geração de energia de forma direta ou indireta através de bombas de calor. Esses sistemas vêm sendo utilizados em vários lugares no mundo, principalmente em lugares onde o inverno é rigoroso e os gastos com aquecimentos de residências, piscinas e processos produtivos é alto. Como exemplo de projetos temos Springhill Project (Canadá), Wismut Mine (Alemanha), Heerlen Project (Holanda), entre outros.

Dentre as minas que atuam em grandes profundidades, temos a mina de ouro Mponeng, na África do Sul, que opera há quase 4 mil metros de profundidade, atingindo temperaturas superiores a 66°C. Isso eleva o custo de operação, na parte de condicionamento de mina, cuja ventilação é feita através da injeção conjunta de ar e gelo a fim de atingir uma temperatura adequada de trabalho para os operários ali presentes e todo este potencial energético é desperdiçado. Estudos para reduzir custos de operação desta mina são constantes e importantes devido à quantidade de ouro ainda presente na mesma, que segue em produção e com projetos de expansão.

Uma vez que, a cada dia, maiores profundidades têm de ser atingidas para a extração de bens minerais, temos a tendência do aumento da demanda energética nas minerações, então o

aproveitamento do potencial geotérmico de uma mina subterrânea poderia ajudar na redução dos impactos gerados e/ou viabilizar empreendimento?

1.2 Justificativa

Cada vez mais a busca por fontes renováveis de energia, bem como a redução de emissões, estão tornando-se preocupações em todos os países, de forma que estudos para a melhoria da eficiência dos sistemas de aproveitamos de tais recursos são comuns.

A questão energética também é objeto de preocupação na mineração, tanto pelo uso racional em situações comuns, quanto pelo uso obrigatório nos casos da manutenção de refrigeração de frentes de lavra.

Um dos mais importantes custos de operação subterrânea é a ventilação das frentes de trabalho que, além de fornecer um fluxo de ar respirável na mina, tem também a função de remover gases nocivos e particulados em suspensão das galerias. Outra função altamente importante da ventilação é a climatização do ambiente, controlando a temperatura para gerar um ambiente menos agressivo para os trabalhadores que ali exercem suas funções. Porém este controle térmico exige muitas vezes um pré-aquecimento ou uma pré-refrigeração, assim altos custos estão associados a este condicionamento de mina.

Buscando um melhor aproveitamento de recursos e uma redução dos custos de operação, Wiley (2015) cita em seu trabalho a técnica de VOD (ventilação por demanda), em que é feito um controle dos fluxos de ar na mina levando em conta as influências térmicas da mina bem como os sistemas em operação na mesma, de modo a fornecer quantidades corretas de ventilação assim reduzindo o custo de operação da mina. Desta forma, o ponto ideal de operação da ventilação é muito específico e deve ser estudado caso a caso, levando em conta fatores climáticos, propriedades das rochas, auto compressão, equipamentos e pessoal presente na mina combinado com a geometria da mesma, assim sendo possível uma estimativa do balanço térmico total da mina.

Assim, Bartsch *et al* (2010) citam em seu trabalho a automação e otimização dos sistemas de ventilação em conjunto da técnica de VOD na mina de níquel Rim South mostrada na Figura 1.1. Mina esta que possuía custos operacionais de quase US\$ 6 milhões/ano antes da implementação da técnica e após obtiveram uma economia de 48,9%, aproximadamente US\$ 3 milhões em redução de custos obtidos com a redução de 52,8% do uso de energia elétrica e

23,6% do uso de propano, mostrando o quão importante é para uma mina o bom aproveitamento energético e o uso consciente de recursos para uma produção menos onerosa.

As plantas de refrigeração são indicadas para minas muito profundas e extensas, onde as trocas de calor do ar aduzido com a rocha virgem são altas, elevando a temperatura do ar e reduzindo o conforto térmico dos trabalhadores. No Brasil podem-se citar os exemplos de Taquari-Vassouras e a Mina Cuiabá, que possuem sistema semelhante de refrigeração, Oliveira (2013).



Figura 1.1 - Vista geral das instalações em superfície da Mina de níquel Rim South.

Fonte: Bartsch *et al* (2010)

E nesta busca de redução de custos e utilização de recursos energéticos renováveis temos a geotermia que é o aproveitamento do calor interno da Terra para a produção de energia elétrica seja ela de forma direta ou indireta. Este tipo de aproveitamento energético vem sendo cada vez mais utilizado como mostra o gráfico da Figura 1.2, em que é relacionado o consumo energético em Megawatt elétrico (MWe) ao decorrer dos anos.

Rodrigues e Díaz (2009), após estudar a mina Springhill no Canadá, afirmam ser possível obter 215 kW utilizando cerca de 20 m³ de água bombeada em uma mina de 500 m de profundidade, o que, segundo os mesmos autores, seria capaz de alimentar 35 casas ou 150 apartamentos assim sendo um promissor auxiliar de uma matriz energética e de baixo impacto ambiental.

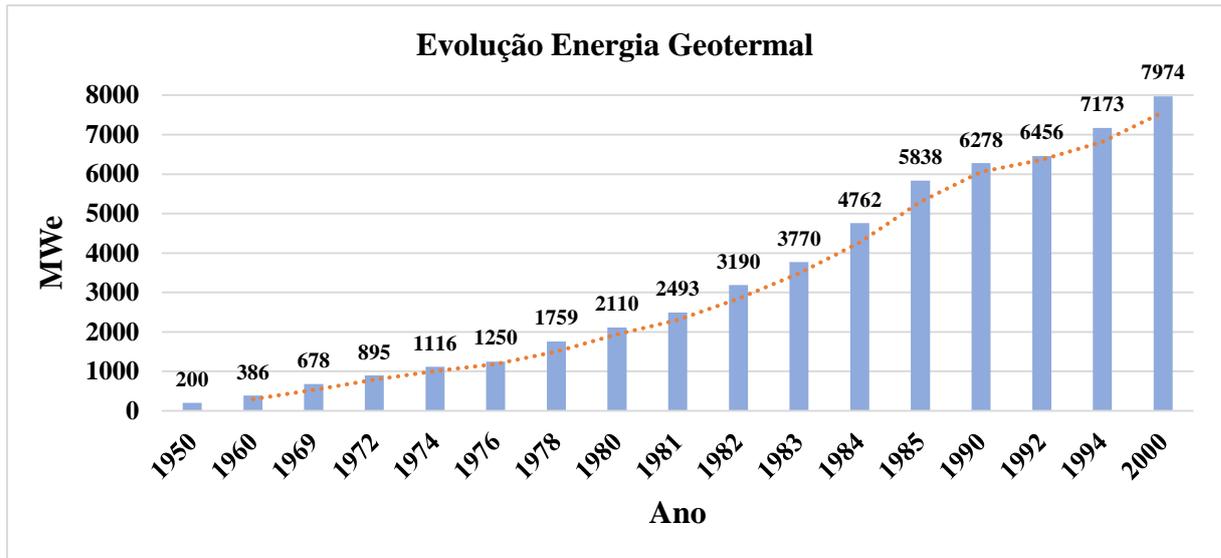


Figura 1.2 - Evolução do uso mundial de energia geotermal.

Fonte: Barbier (2002).

Ainda segundo Rodrigues e Díaz (2009), os fatores que justificam o uso desta fonte de energia são os seguintes.

- Contribui para a redução da emissão de CO₂ substituindo em alguns casos o consumo de combustíveis fósseis;
- Possui custos competitivos se comparado a outras fontes de energia alternativa;
- É um recurso que todo país possui não dependendo de estabilidades políticas e de produções de outros países para se manter;
- Diferente dos outros tipos de energia renovável como solar, eólica e hidráulica, este tem pouca dependência das condições climáticas;
- A área requerida para implementação das plantas geotermiais é menor que as áreas requeridas para outros tipos de fontes de energia.
- A técnica não contamina as redondezas do empreendimento.
- A técnica tem múltiplas aplicações.

Assim este trabalho de revisão bibliográfica tem como finalidade analisar a técnica de aproveitamento geotérmico e discutir sobre as vantagens deste tipo de aproveitamento energético e a viabilidade do uso de tais técnicas em um plano de fechamento de minas subterrâneas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Apresentar e discutir o aproveitamento geotérmico como uma opção para plano de fechamento de minas subterrâneas, no qual pode ser executado em conjunto com a operação, momento este em que o empreendimento está capitalizado, facilitando a implementação deste.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Abordar o sobre energias renováveis, potenciais geotérmicos e suas formas utilização.
- Revisar os conceitos envolvidos na utilização de recursos geotérmicos de baixa entalpia nas bibliografias publicadas.
- Introduzir conceitualmente os sistemas de aproveitamento das áreas com potencial geotérmico.
- Fazer uma breve abordagem sobre as possíveis vantagens e desvantagens do sistema.

1.4 Metodologia

Foi realizado um estudo de revisão bibliográfica acerca da utilização dos potenciais geotérmicos de uma mina subterrânea para produção de energia elétrica, seja ela direta ou indireta, utilizando-se de artigos científicos e base de dados disponíveis na literatura atual.

Foram levados em consideração casos publicados sobre uso de tal técnica, bem como as estruturas necessárias para construção do sistema, abordando as possíveis vantagens adquiridas com uso da mesma como uma opção para o fechamento de mina.

De acordo com Ferrari (1982), a pesquisa bibliográfica tem por finalidade conhecer as contribuições científicas realizadas sobre determinado assunto. A metodologia baseia-se na definição de pesquisa bibliográfica proposta pelo citado autor, e na definição de pesquisa exploratória proposta por Gil (2008), segundo o qual, o trabalho é desenvolvido a partir de material já elaborado, constituído de livros e artigos científicos.

1.5 Estrutura do trabalho

No primeiro capítulo faz-se uma breve introdução acerca da mineração e a relação do aumento do grau geotérmico com o aumento da profundidade da extração em minas subterrâneas e dos usos para esse potencial geotérmico. É apresentada a formulação do problema, a justificativa, o objetivo geral e os objetivos específicos, a metodologia, bem como a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo refere-se a uma revisão bibliográfica sobre energias renováveis e minas subterrâneas com o foco em aproveitamento do potencial geotérmico, discutindo as vantagens deste tipo de aproveitamento energético e a viabilidade do uso de tais técnicas como parte de um plano de fechamento de mina subterrânea.

Por fim, o terceiro capítulo expõe as conclusões desse estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Energias renováveis

Com o aumento da demanda energética mundial, foi necessária uma busca por maneiras de se gerar energia de forma mais eficiente e limpa. Assim, cada vez mais fontes energéticas renováveis fazem parte das matrizes energéticas de vários países, ajudando a reduzir o impacto gerado pela queima de combustíveis fósseis e contribuindo para a redução de emissões de gases estufa como o CO₂.

Energias renováveis são aquelas fontes de energia em que não é possível estabelecer um fim temporal para a sua utilização, portanto são consideradas virtualmente inesgotáveis por sua capacidade de se regenerar e baixo impacto ao meio ambiente.

Como exemplos destes tipos de fontes de aproveitamento energético que se renovam seguindo fluxos próprios, podemos citar águas no processo hídrico, os ventos no eólico, o sol no solar, a temperatura interna da Terra na geotérmica e a matéria orgânica na biomassa.

Assim podemos enumerar algumas vantagens dos usos de energias renováveis, como as seguintes.

- Podem ser consideradas inesgotáveis na escala humana comparadas aos combustíveis fósseis;
- O seu impacto ambiental é menor do que os provocados pelas fontes de energia com origem nos combustíveis fósseis, uma vez que não produzem CO₂ ou outros gases relacionados ao “efeito estufa”;
- Permitem a criação de novos empregos em áreas específicas de cada tipo de aproveitamento energético;
- Reduzem a dependência de combustíveis fósseis;
- Confere autonomia energética a um país, uma vez que a sua utilização não depende de importação de combustíveis fósseis;
- Incentivam a investigação de novas tecnologias que permitam melhor eficiência energética.

Mas estes sistemas não possuem somente vantagens e algumas desvantagens citadas abaixo acabam por dificultar a troca dos sistemas mais tradicionais de produção energética pelos sistemas energéticos renováveis, como:

- custos elevados de investimento e infraestruturas apropriadas;
- impactos visuais negativos no meio ambiente;
- Energia de Biomassa: método de combustão da biomassa não é limpo;
- Energia Hidroelétrica: causa inundação de solos que podem ter impacto na fauna e flora locais;
- Energia Solar e Geotérmica: custos iniciais muito elevados;
- Energia das Ondas: depende de localizações específicas e é bastante dispendiosa;
- Energia Eólica: custo inicial elevado e existência de ruídos durante o funcionamento do sistema.

Na Figura 2.1 podemos observar a oferta interna de energia no Brasil, na qual podemos observar que as fontes renováveis de energia fazem parte de mais de 40% da oferta total, com grande participação de fontes como etanol e bagaço de cana e pelo seu potencial hidroelétrico. Mas quando olhamos a oferta interna de energia elétrica, mostrada na Figura 2.2, vemos que as fontes renováveis têm grande papel na matriz energética brasileira, com cerca de 75% do total de energia gerada no país em 2015. Destas, mais de 80% vem das hidroelétricas, mostrando a grande dependência em fontes hídricas, fato este que causa grandes dificuldades ao país em tempos de seca.

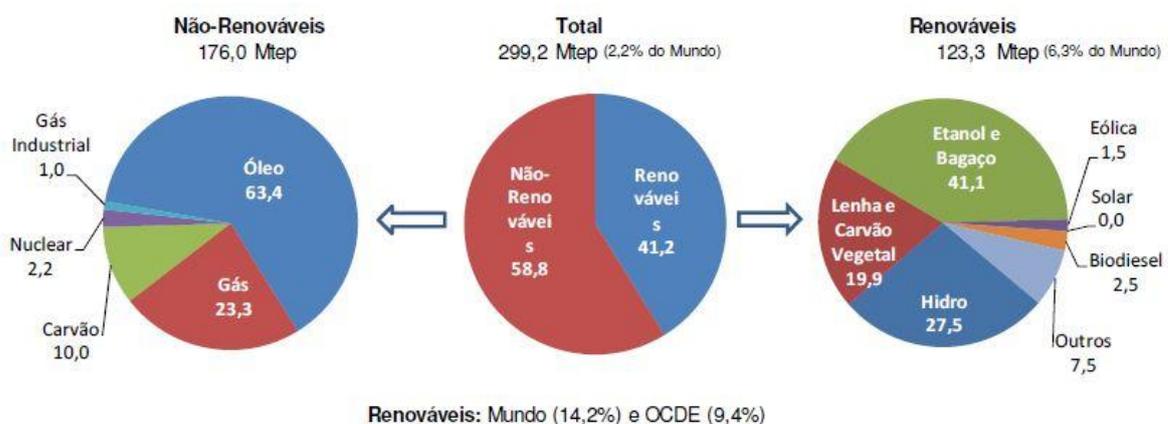


Figura 2.1 - Oferta interna de energia no Brasil - 2015 (%)

Fonte: Ministério de Minas e Energia (2016)

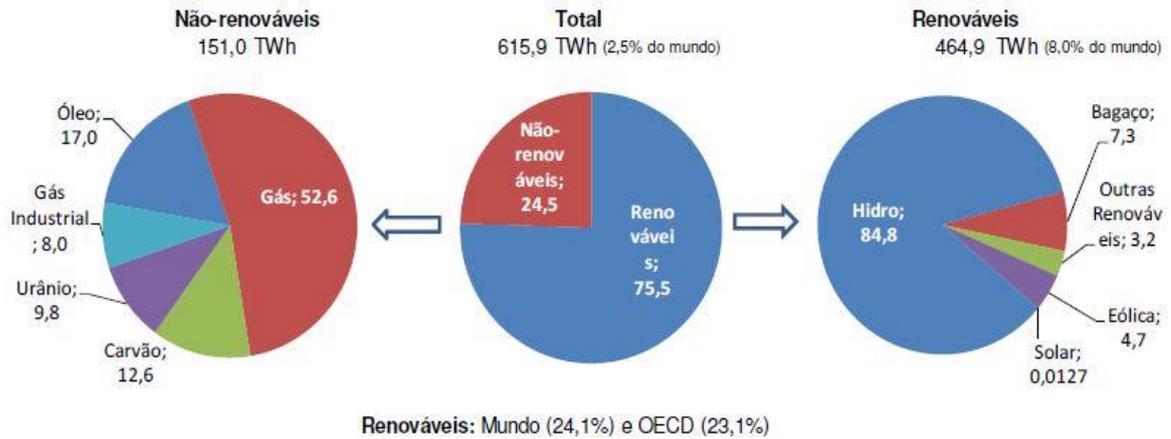


Figura 2.2 - Oferta interna de energia elétrica no Brasil - 2015 (%)

Fonte: Ministério de Minas e Energia (2016)

Também podemos observar nas Figura 2.1 e 2.2 a grande contribuição do Brasil na produção energética com base em recursos renováveis, em um comparativo com o uso de recursos renováveis no mundo e na OECD (Organização para Cooperação e o Desenvolvimento Econômico) que é composta pelos países de vários continentes (Alemanha, Austrália, Áustria, Bélgica, Canadá, Chile, Coréia do Sul, Dinamarca, Eslovênia, Espanha, Estados Unidos, Estônia, Finlândia, França, Grécia, Holanda, Hungria, Irlanda, Islândia, Israel, Itália, Japão, Luxemburgo, México, Noruega, Nova Zelândia, Polônia, Portugal, Reino Unido, República Eslovaca, República Tcheca, Suíça, Suécia e Turquia).

Como o intuito deste trabalho é discutir sobre o aproveitamento geotérmico em minas subterrâneas, aprofundaremos no que se diz respeito ao aproveitamento de fontes geotermais e suas aplicabilidades.

2.1.1 Energia Geotérmica

A Terra é constituída por núcleo, manto e crosta, sendo o núcleo a parte mais profunda e a crosta a mais superficial, como mostra a Figura 2.3. Com o aumento da profundidade temos um aumento do grau geotérmico. Segundo Barbier (1997), em média temos um aumento de 30°C/Km de profundidade. Esse aumento de temperatura das rochas é devido à dissipação do calor interno da Terra que, devido à heterogeneidade na crosta terrestre, acaba por gerar regiões anômalas de temperatura com valores superiores ou inferiores a esta média.

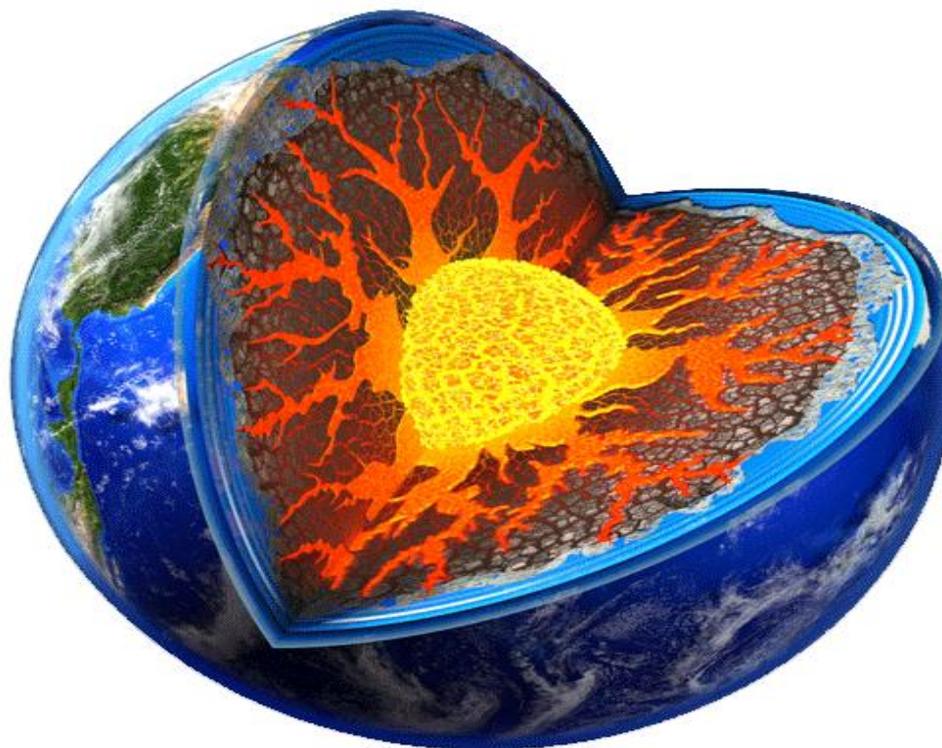


Figura 2.3 - Representação da dinâmica interna da Terra

Fonte: Geografia Legal (2016)

O uso das fontes geotermiais data de 10.000 anos atrás, onde populações indígenas utilizavam tais recursos para cozinhar, em banhos e limpezas em geral e por séculos os romanos usaram energia geotermal para aquecer a água nas casas de banho, tratar doenças e aquecimentos de suas casas. As aplicações modernas começaram no século XIX com a introdução de uma estrutura comercial e o desenvolvimento de bombas de calor e a primeira aplicação comercial do sistema foi nos Estados Unidos no ano de 1830, conforme Abbasy (2013).

Em 1892, Boise, Idaho, se tornou o primeiro distrito do mundo aquecido por sistema geotérmico, com 200 casas e 40 centros comerciais atendidos. Em 1904, a primeira planta de energia geotérmica foi construída em Larderello Fields, Itália, local em que o vapor de água foi utilizado para produzir energia elétrica. Em 1921 os Estados Unidos construíram sua primeira planta de energia geotérmica com capacidade de 250 kW e durante os anos 60 foi construída a primeira planta de larga escala para produção de energia elétrica a partir de recurso geotermal com capacidade de 11MW, segundo Abbasy (2013).

Ainda segundo Abbasy (2013), atualmente mais de 20 nações produzem energia geotermal e somente nos Estados Unidos existem mais de 60 plantas de produção de energia

geotermal de produção significativa operando e a Califórnia lidera como a maior produtora do mundo de energia geotermal, no qual, somente a Chevron Company tem a capacidade de fornecer energia para 7 milhões de residências.

A quantidade de energia geotérmica é enorme e se fosse aproveitado apenas 1% do calor que é dissipado nos 10 km de crosta terrestre, teríamos o equivalente a 500 vezes a capacidade total energética de todo óleo e gás da Terra, segundo Herzog *et al* (2004). Porém, segundo os mesmos autores, apesar deste gigantesco potencial existir e ser praticamente inesgotável, muito pouco dele é utilizado.

As zonas de elevado gradiente geotérmico são de interesse prioritário para a geotermia, como zonas de vulcanismo, bordas de placas tectônicas e/ou locais que, por alguma heterogeneidade na crosta, possuam maior potencial, como podemos analisar na Figura 2.4, demonstrando o potencial de geração energética por metro quadrado. Porém zonas com gradientes médios e inferiores também podem ser de grande interesse se for analisado com cuidado o custo/benefício para o empreendimento.

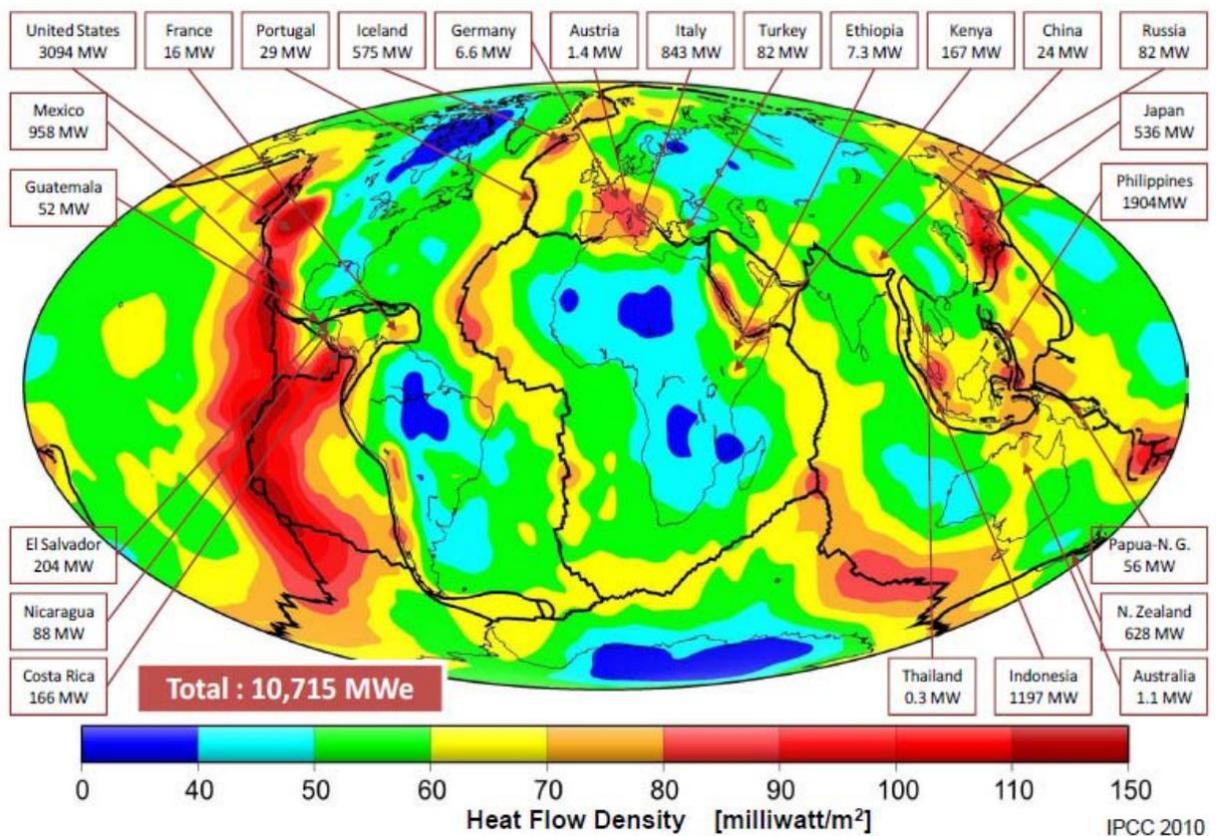


Figura 2.4 -Distribuição do potencial geotérmico da Terra

Fonte: Menezes (2012)

No Brasil, ainda são poucos os estudos na área de utilização deste recurso energético que, segundo Souza Filho (2012), podem ser classificados como:

- Baixa entalpia (inferior a 150°C): Este tipo de energia é mais comumente utilizado e forma direta como em termas, na agricultura, na piscicultura, processos industriais e aquecimento de piscinas e ambientes.
- Alta entalpia (superior a 150°C): Este tipo energia pode ser utilizado para a produção de energia elétrica e aquecimento de grandes ambientes.

Na Figura 2.5, pode-se analisar a distribuição do potencial energético do tipo geotérmico na América do Sul em mW/m^2 , em que podemos observar a predominância de regiões de baixa entalpia no Brasil dada a estabilidade tectônica do país, que está situado no centro da placa sul-americana.

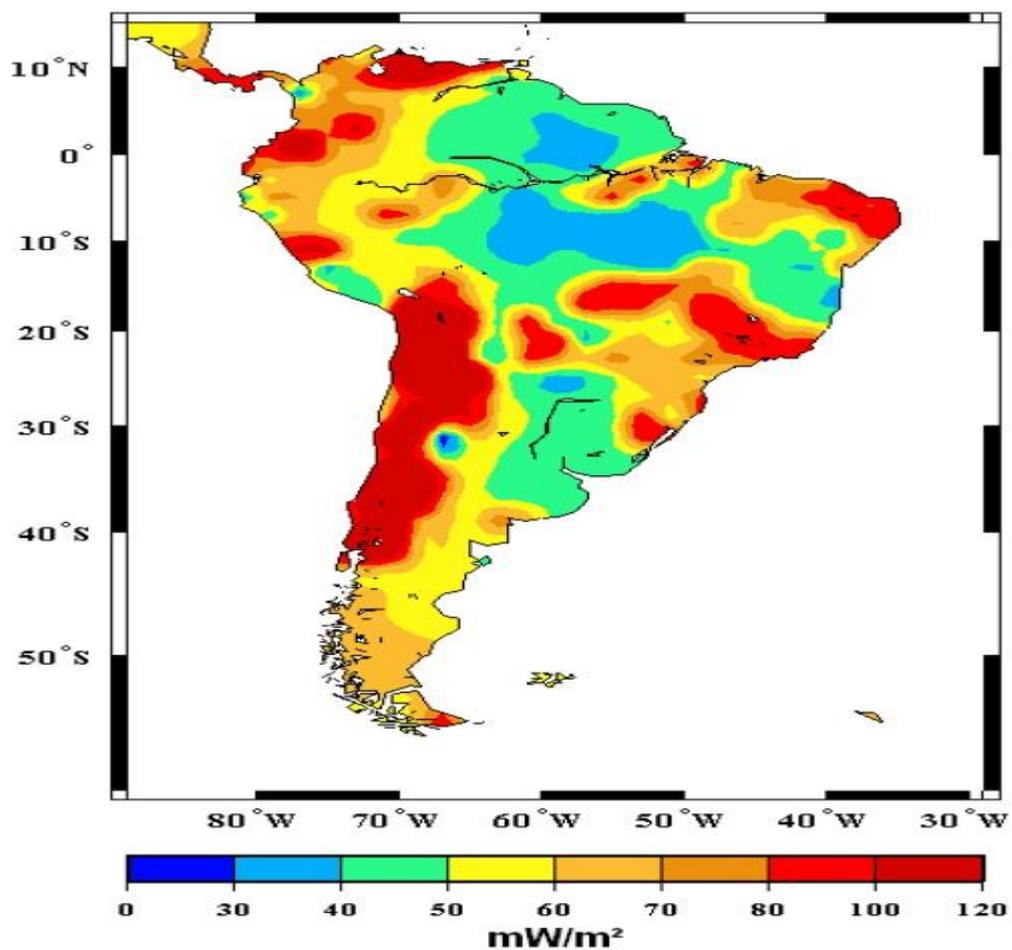


Figura 2.5 - Distribuição do potencial energético de recurso geotérmico na América do Sul

Fonte: Hamza *et al* (2008)

Segundo estudo de Hamza *et al* (2010), no Brasil foram identificados potenciais para sistemas de alta temperatura geotérmica, porém estes potenciais estão localizados nas ilhas atlânticas de Fernando de Noronha e Trindade. Porém, neste mesmo estudo afirma-se que recursos de baixa entalpia foram identificados em um número significativo no Brasil, sendo que a maior parte destes está localizado na região centro-oeste (Goiás e Mato Grosso) e sul (Santa Catarina) do país. Os autores também relatam que existe um potencial significativo para o uso em grande escala de água de baixa temperatura geotérmica que pode ser utilizada na indústria e aquecimento de espaços na parte central da bacia do Paraná (regiões Sul e Sudeste do Brasil).

Nos estudos de potencial geotérmico, as profundidades de 3 a 5 Km em Minas Gerais indicaram que as regiões da bacia do São Francisco, Triângulo Mineiro e pequenos trechos da região Sul e Sudeste do estado apresentavam potenciais de alta entalpia com temperaturas entre 150 °C a 180 °C, conforme Alexandrino *et al* (2012). Assim Rabelo *et al.* (2002) fazem um comparativo de quantidade de energia que pode ser obtida de um reservatório geotérmico usando como exemplo o Aquífero Guarani, cujo potencial de baixa entalpia atinge temperaturas de 70°C no máximo, e segundo o mesmo, a reserva de energia geotérmica neste aquífero é equivalente a 50 bilhões de toneladas de petróleo.

2.2 Mina Subterrânea

Segundo Oliveira Junior (2006) “...Minerar é a arte de extrair economicamente bens minerais da crosta terrestre, utilizando técnicas adequadas a cada situação. Estas técnicas visam minimizar os impactos ambientais ao meio ambiente, dentro dos princípios da conservação mineral, e tem como compromisso a recuperação das áreas mineradas durante a extração e após a desativação, dando a estas áreas um outro uso apropriado...”

A Organização das Nações Unidas (1987) define desenvolvimento sustentável como o desenvolvimento que encontra as necessidades atuais sem comprometer a habilidade das futuras gerações de atender suas próprias necessidades. Na essência, o desenvolvimento sustentável é um processo de mudança no qual a utilização dos recursos, investimentos, tecnologias e mudanças institucionais estão em harmonia, satisfazendo as aspirações e necessidades humanas no presente e futuro.

Assim devemos então elaborar um projeto para extração do bem mineral de forma menos impactante, bem como elaborar o plano de fechamento da mina que leve em conta a recuperação da área impactada com todos os aspectos técnicos de preocupação no encerramento

das atividades do empreendimento. Ribeiro e Mendes (2013) definem que o fechamento de mina deve ser planejado desde a concepção do empreendimento visando, sobretudo, garantir que no pós-mina, os impactos ambientais, sociais e econômicos sejam mitigados e que a área impactada tenha condições seguras e estáveis, a partir das melhores técnicas de controle e monitoramento, proporcionando um uso futuro que respeite os aspectos socioambientais e econômicos da área de influência do empreendimento.

Então os empreendimentos minerários devem apresentar um estudo de impacto ambiental (EIA), relatório de impacto ambiental (RIMA) e o plano de recuperação de área degradada (PRAD), uma vez que a responsabilidade pela recuperação da área é do empreendedor e ele deve arcar com os custos de mitigação dos impactos por ele gerados. O Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM) reconhece a atividade minerária como importante para o desenvolvimento mas também afirma que esta deve ser voltada para função ambiental, sendo necessária o estabelecimento de instrumentos a fim de garantir a reabilitação das áreas mineradas e a proteção do meio ambiente. Desta forma, Deliberação Normativa no.127/ 2008 do COPAM, segundo Silva (2016) define no artigo 5º que seja apresentado dois anos antes do fechamento da mina o Plano Ambiental de Fechamento de Mina (PAFEM), que é um instrumento de gestão ambiental composto por todas as informações necessárias que visam à manutenção não só da segurança mas também do monitoramento e da reabilitação da área impactada pela atividade.

Um fechamento de mina, seja ela em mina subterrânea ou a céu aberto, pode ser dividido em descomissionamento, reabilitação, monitoramento e manutenção e o pós-fechamento. Porém em uma mina subterrânea vários itens de preocupação devem ser levados em conta como os túneis, poços, pilares, galerias, acessos e contaminantes presentes, bem como os impactos sociais gerados pelo fim da atividade. Para se elaborar um plano eficaz de encerramento de atividades, devemos levar em conta que o novo uso da área deve ser de forma a contribuir com o desenvolvimento econômico, com meio ambiente e com a sociedade que é a principal impactada por todo o ônus da atividade.

Silva (2016) apresenta casos de fechamento das minas com diferentes destinos. Algumas foram completamente exauridas e fechadas como é o caso da Mina Cabaçal de ouro e cobre da Mineração Manati Ltda (Rio Tinto) que, após o encerramento das atividades, recuperou toda área como pode ser visto nas Figura 2.6 e Figura 2.7. Por este trabalho de recuperação, a empresa foi a primeira no Brasil a receber, em 1992, um

Certificado de Descomissionamento Ambiental, concedido pela Secretaria de Meio Ambiente do Estado do Mato Grosso atestando o cumprimento dos trabalhos de fechamento de mina e reabilitação da área minerada.



Figura 2.6 - Entrada da Mina Cabaçal após recuperação

Fonte: Rio Tinto (2008)



Figura 2.7 - Barragem de rejeitos da Mina Cabaçal após recuperação

Fonte: Rio Tinto (2008)

Silva (2016) cita também caso da Mina de Passagem, uma antiga mina de ouro localizada na cidade de Mariana, Minas Gerais, que após o encerramento das atividades teve sua área destinada para um novo uso, sendo transformada em uma atração turística como observamos na Figura 2.8. A mina é considerada, segundo Miranda (2010), a maior mina de ouro aberta à visitação do mundo onde também é possível fazer mergulho nas áreas inundadas da mina como mostra a Figura 2.9.

E ainda tem-se casos de fechamentos temporários, onde as minas encerram suas atividades por um certo período de tempo e depois acabam por retomar suas atividades, por viabilidade econômica e/ou tecnológica, como são os casos citados por Silva (2016) da Mina São Bento, em Santa Bárbara-MG, atual Córrego do Sítio II e a Mina Brejuí, em Currais Novos-RN.



Figura 2.8 - Trolley de visitação da Mina de Passagem.

Fonte: Revista Fernão Dias (2016)



Figura 2.9 - Escada de acesso ao lago para mergulhadores na Mina de Passagem.

Fonte: Miranda (2010)

Ao final das atividades em uma mina subterrânea, cessado o bombeamento, é comum deixar inundar-se a mesma para assim impedir a circulação nas dependências da mina. Inundação esta que pode ocorrer de 3 maneiras como através das águas de chuva que por ação da gravidade acaba encontrando um caminho para as galerias subterrâneas; pelas águas de aquíferos que podem ter sido interceptados pela abertura de galerias de exploração; ou também se pode fazer a inundação artificial, bombeando águas de lagos e rios próximos ao empreendimento para dentro da mina.

Segundo Ghoreishi- Madiseh *et al.* (2012) a infiltração de água em uma mina irá depender da permeabilidade do maciço rochoso, a qual pode ser de 2 tipos, a permeabilidade natural causada pelas formações geológicas e processos tectônicos e a artificial feita pelo homem, que no caso do da mineração subterrânea são os poços, galeria e demais aberturas do empreendimento onde a água pode fluir com resistência praticamente nula. Mas o fator mais importante a ser estudado para a implementação do sistema geotérmico em uma mina subterrânea é a condutividade térmica das rochas, pois a partir deste parâmetro será definida a capacidade de extração térmica de uma região e pode-se melhor dimensionar o sistema.

E então, dentro do contexto sustentabilidade e redução de danos socioambientais, temos a energia geotérmica como grande promessa para fechamentos de mina, uma vez que é possível utilizar estas áreas de mineração que seriam “abandonadas” para geração de energia de modo a

criar uma matriz energética auxiliar promovendo o desenvolvimento sustentável e reduzindo os impactos gerados pelo fim do empreendimento, que acaba por impactar diretamente as pessoas na região.

2.3 Sistemas de Aproveitamento do Potencial Geotérmico

Na busca por formas mais sustentáveis de se produzir energia junto com a necessidade de redução de emissões dos gases poluentes, surgem os sistemas de aproveitamento da energia geotérmica, produzida pela dissipação do calor interno da Terra proveniente do movimento dos fluidos que estão a altas temperaturas e pressões abaixo da crosta terrestre. A dissipação desta energia ocorre de maneira irregular por toda crosta e os maiores potenciais surgem em zonas de bordas de placas tectônicas e em locais, que por motivo geológico, tenham anomalias como espessura de crosta, tectonismos, vulcanismo etc. A quantidade de energia geotermal é enorme, segundo Herzog *et al* (2004) e se conseguíssemos aproveitar 1% de toda energia geotermal dos primeiros 10 km de crosta terrestre isso seria o equivalente 500 vezes a energia contida em toda reserva mundial de petróleo e gás daquela época. Ainda segundo o mesmo, apesar desta energia ser considerada inesgotável ela não é bem distribuída por todo mundo, então contamos com pontos de maior potencial geotérmico que podem chegar a atingir a superfície terrestre como pode ser sintetizado pela Figura 2.10. Porém, na maioria dos casos o maior potencial se encontra em altas profundidade sendo que muitas das vezes é necessário a escavação do solo para atingir um potencial economicamente viável de aproveitamento.

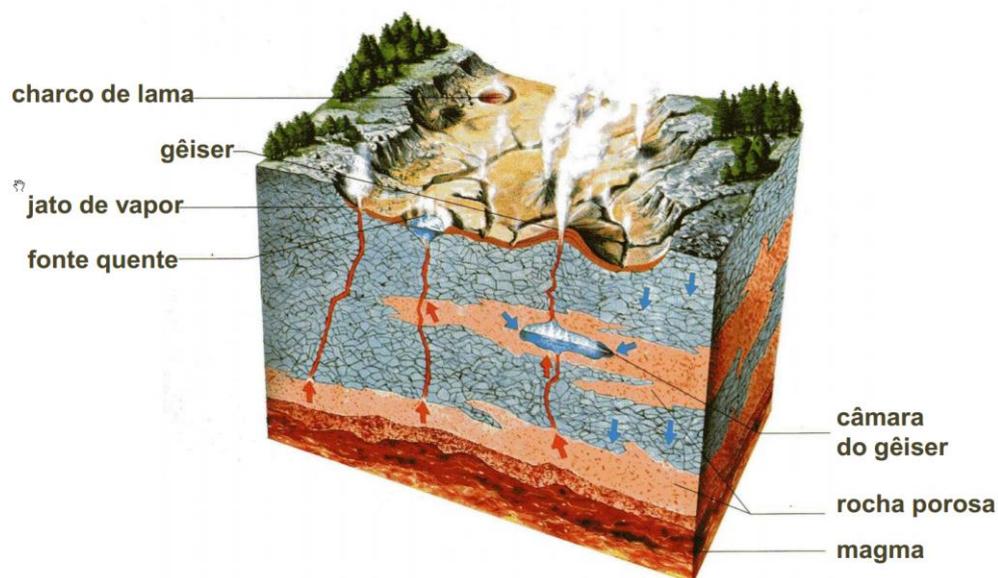


Figura 2.10 - Simplificação da dinâmica interna de uma região de alto potencial geotérmico

Fonte: Menezes (2012)

De acordo com Wright (1998) esta fonte é capaz de suprir a necessidade global energética por 6 milhões de anos baseado no consumo energético da época. Apesar de ser considerado um recurso renovável e sustentável, a utilização deste, segundo Lund (2007), ainda tem limitações tecnológicas e econômicas. Depende-se de locais de altos potenciais e baixo custo de perfuração como, por exemplo, locais onde o magma penetra em direção a superfície gerando sítios geotérmicos com temperaturas superiores a 150°C com potencial para geração de energia elétrica e com fácil acesso. Tais regiões são raras e acabam por limitar tal uso em certas regiões.

Abbasy (2013) define recurso geotérmico quando as rochas atingem temperaturas a partir de 20°C, e ainda segundo o mesmo autor, uma vez que uma bomba térmica é aplicada ao sistema de aproveitamento deste recurso este limite torna-se mais baixo, sendo possível utilizar temperaturas acima de 5° C para sistemas de uso direto, que é o alvo deste trabalho. Porém se a intenção do sistema é gerar energia elétrica a partir de recursos de baixa entalpia, deve-se implementar um sistema de ebulição secundária para se obter vapor d'água. Entretanto segundo Barbier (2002), recursos geotérmicos com temperaturas superiores a 250°C possuem baixa eficiência para geração de energia elétrica, cerca de 10% a 17%, praticamente um terço da eficiência de usinas nucleares ou obtidas por combustíveis fósseis. Ainda segundo o mesmo autor, a baixa eficiência da utilização do recurso é compensada economicamente, uma vez que aproximadamente 50% dos custos de implantação são atribuídos a caracterização do reservatório, perfuração dos poços de produção e injeção como pode ser observado na Figura 2.11, apresentando um esquema simplificado de um sistema de aproveitamento geotérmico mostrando em azul o fluido injetado ainda frio e em vermelho o fluido aquecido sendo recuperado.

Entretanto, como Stefánsson (2002) ressalta, apesar do alto investimento inicial, os custos de operação e manutenção são relativamente baixos, podendo viabilizar o investimento nesse tipo de tecnologia. Porém como neste trabalho o objetivo principal é a discussão sobre o aproveitamento geotérmico em minas subterrâneas e estes em sua totalidade são de baixa entalpia, <150° C, um foco maior foi dado a sistemas de uso direto deste recurso bem como suas aplicações e tipos de sistemas montados para sua utilização, em que podemos citar os sistemas de ciclo aberto e ciclo fechado.

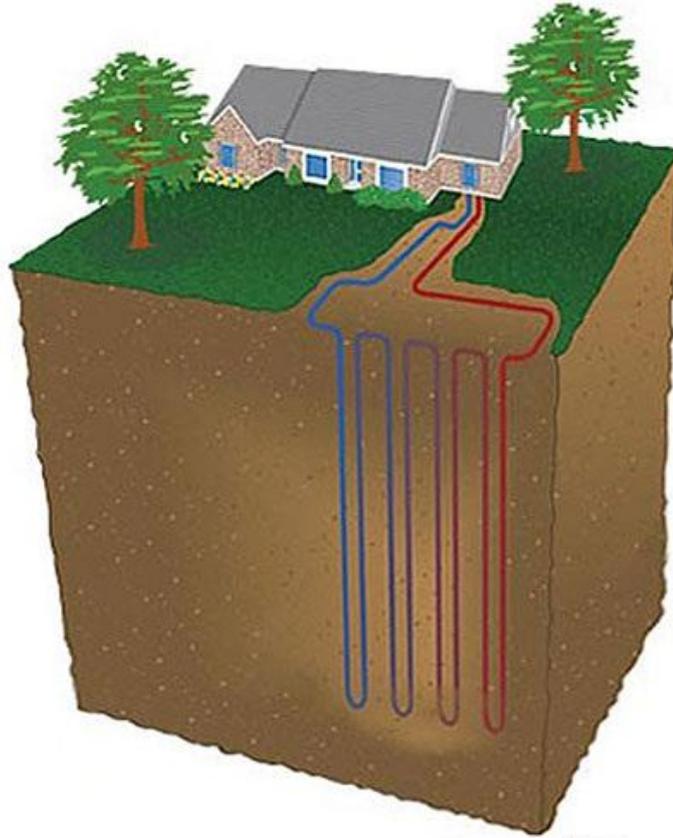


Figura 2.11 - Sistema de aproveitamento geotérmico simplificado

Fonte: O Frio Que Vem do Sol (2016)

2.3.1 Usos diretos

A partir de um recurso geotérmico é possível produzir energia elétrica, mas por sua necessidade de elevadas temperaturas acaba por limitar tal tipo de aproveitamento a regiões muito específicas da Terra, dependendo de fatores geológicos, econômicos e sociais. Desta forma, surge outro tipo de uso para o aproveitamento do calor da Terra, o dito uso direto, que é comumente utilizado através do auxílio de bombas de calor que a troca de calor de um fluido, que neste caso é a água de mina com temperaturas inferiores a 150°C , e o transfere para outro obtendo um grande potencial de uso seja ele na indústria ou residencial, segundo Harrison *et al* (1990).

Segundo Lund (2007), o uso mais comum para recursos de baixa entalpia é para aquecimento/resfriamento de ambientes, porém este depende da região geográfica, condições climáticas, volume e temperatura do fluido geotermal do reservatório, bem como da acessibilidade e sustentabilidade do recurso. Conseqüentemente, os tipos de usos podem variar dependendo da necessidade, que explica seu uso mais popular para aquecimento em regiões de

inverno rigoroso e altos gastos com climatização de ambientes. Ainda segundo o mesmo, a utilização direta deste recurso é muito simples e na maioria dos casos a produção começa em menos de um ano após o início da implementação do sistema.

Lund (2004) cita em seu trabalho que a Islândia é o líder em uso geotermal, no qual mais de 90% de sua população possui aquecimento residencial a partir de recursos geotermiais e ainda cerca de 50% de toda energia consumida no país também é proveniente de tal recurso. O mesmo autor cita também que sistemas de uso direto trabalham com baixas temperaturas, em média de 5°C a 40°C, recurso este disponível em praticamente todo país assim sendo possível popularizar sua utilização não mais dependendo somente de condições muito específicas para formação de sítios de alta temperatura.

Osgener *et al* (2007) citam em seu trabalho algumas possíveis aplicações de uso direto de recursos geotérmicos de baixa temperatura, como o uso de bombas de calor, climatização e ambientes, estufas de plantas, lagoas de aquicultura, secagem agrícola, processos industriais, higiene pessoal, natação, derretimento de neve, entre outros. As bombas térmicas são aplicadas em potenciais de moderada a baixa temperatura aumentando a eficiência e reduzindo os custos operacionais dos sistemas de aquecimento/resfriamento, utilizando uma fonte quente no qual é extraída o calor e o torna disponível em outro lugar, para onde é dissipado. Lobo *et al.* (2004) afirmam que a vantagem de bombear o calor é a baixa utilização de energia elétrica, se comparada na conversão de energia elétrica em calor através de fornalhas e aquecedores elétricos ou calefatos radiantes convencionais. Além disso, deve-se considerar também o aspecto ambiental com a grande redução de emissões de CO₂ na atmosfera.

Vale a pena mais uma vez ressaltar que as aplicações estão associadas a regiões onde o sistema é aplicado e suas necessidades, assim como praticamente todos os trabalhos publicados sobre o assunto foram desenvolvidos em regiões de inverno rigoroso, muitos destes usos não se aplicam a regiões quentes de clima tropical como o Brasil. Então esse trabalho tem como principal ideia iniciar a discussão do assunto bem como abrir o caminho para estudos mais aprofundados de viabilidade e aplicações destes sistemas em regiões de climas e necessidades diferentes. Assim são apresentados mais detalhadamente os dois principais sistemas de aproveitamento de potenciais geotérmicos de baixa entalpia, o sistema fechado (Closed Loop System) e sistema aberto (Open Loop System) bem como alguns elementos básicos dos sistemas com a intenção de esclarecer o funcionamento destes e ainda levantar futuras

discussões sobre possíveis novas aplicações e formas de aproveitamento em um empreendimento mineral em região de clima tropical como o Brasil.

Levando em conta que no Brasil temos casos citados por Hamza *et al* (2005) sobre o uso de águas geotérmicas circuladas nos processos industriais, como em Cornélio Procópio, no Paraná, no qual era utilizada água a 50 °C de dois poços para pré-aquecer as caldeiras de produção de café em pó; e de maneira semelhante em Taubaté, interior de São Paulo, onde utilizavam água geotermal a 48 °C durante as décadas de 1970 a 1980 no processamento industrial de madeira. Este fato demonstrou ser possível o aproveitamento deste recurso em processos industriais e ainda reduzindo os impactos ambientais, vantagem citada por Abbasy (2013), que cita ser possível a redução de aproximadamente 20-50% das emissões de CO₂ usando o sistema geotermal para climatização de residências. É possível ainda reduzir em média 75% a demanda elétrica da mesma, segundo Ostridge (1998).

2.3.1.1 Sistema de Ciclo Fechado (Closed loop system)

A energia geotérmica pode ser aproveitada em diversas maneiras dependendo da necessidade dos que dela se beneficiam. Porém, em função de diversos fatores tais como atividades vulcânicas, decaimento radioativo e condutividade térmica das rochas, pode-se ter potenciais geotérmicos não uniformes pela crosta terrestre. Assim segundo Ashrae (2011) áreas com temperatura mais altas ou com maior fluxo de calor do que a média, são constituídas de maior interesse econômico.

Buscando formas de melhor aproveitamento deste recurso de baixa entalpia, de mais fácil acesso, surgem as bombas de calor geotérmico (Ground Couple Heat Pump) e bomba de calor solo/água (Ground Water Heat Pump) aplicadas a sistemas abertos e fechados. A bomba de calor geotérmico consiste, segundo Ashrae (2011), em um sistema de tubulação de polietileno de alta densidade, sendo que normalmente o fluido de trabalho é água ou água mais anticongelante, formando um ciclo fechado que troca calor com o solo e com a bomba de calor, podendo também ser chamada de bomba de calor com ciclo fechado. Este sistema apresenta algumas vantagens se comparado com bombas de calor solo/água, como eliminar possíveis problemas de contaminação da água, não depender de fonte de água nas proximidades e ainda consumir menos energia no bombeamento.

A disposição da tubulação no sistema fechado pode ser de forma horizontal ou vertical, adaptada à disponibilidade de recurso e demanda por aquecimento da região. Estas tubulações

podem ser enterradas nos poços ou trincheiras como pode ser observado nas Figura 2.12 e Figura 2.13, apresentando uma ideia geral do sistema instalado.



Figura 2.12 - Sistema de ciclo fechado horizontal

Fonte: Botti (2016)



Figura 2.13 - Sistema de ciclo fechado vertical

Fonte: Botti (2016)

Um sistema fechado típico segundo Chiasson (1999), consiste em uma configuração de um até dezenas de poços para trocar calor com o solo, cuja conformação das tubulações em forma de “U” troca calor com o fluido presente no poço, geralmente água, podendo se observar em esquema simplificado na Figura 2.14. Portanto, neste tipo de sistema é possível criar diversas configurações bem como disposição destes tubos. Ainda segundo o mesmo, normalmente as tubulações utilizadas nestes sistemas são de diâmetro entre 19 e 38 milímetros, para poços de geralmente 30,5 a 91,4 metros de profundidade e com diâmetro da boca do furo de 76 a 127 milímetros. Após disposição dos tubos dentro dos poços estes são completados por material que previne a contaminação da água no sistema.

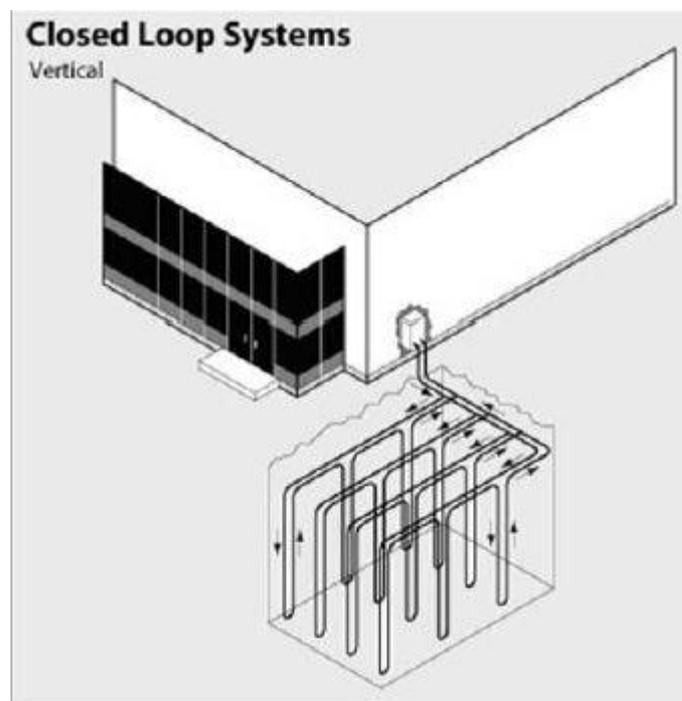


Figura 2.14 - Sistema vertical fechado simplificado

Fonte: Abbasy (2013)

Khan (2004) relata que os sistemas verticais têm como vantagem não necessitarem de grandes áreas para a instalação, além de maior estabilidade do fluxo de troca de calor, a possibilidade da troca de calor com águas subterrâneas e a maior adaptabilidade do sistema, mas também cita o fato de ter um custo inicial de perfuração maior do que do método horizontal. Ashrae (2011) também cita que o dimensionamento de um sistema vertical é um processo complexo, pois existem diversas formações e propriedades geológicas que influenciam no seu desempenho térmico. Portanto, deve-se projetar adequadamente o tamanho e a profundidade do trocador de calor de maneira que não fique grande demais e eleve o custo inicial da obra de forma a inviabilizá-la e nem fique pequeno demais que não atenda à demanda térmica do local.

Segundo Spitler *et al.* (2009), diversas pesquisas foram realizadas para produzir métodos e modelos numéricos que auxiliem no dimensionamento destes sistemas, estes porém são combinações de vários fatores como modelos de edifícios, bombas de calor e outros componentes para obter-se uma previsão da temperatura que a água entra na bomba de calor, taxas de transferência de calor do solo e consumo de energia da bomba por tempo.

Por outro lado na instalação de sistemas fechados horizontais não é preciso realizar grandes perfurações, pois a configuração típica consiste em tubos dispostos em valas ou trincheiras, em série ou paralelo, como pode ser visto na Figura 2.15. Segundo Hernandez Neto e Voltani (2013), estas são escavadas a uma profundidade típica de 0,91 a 2,00 metros, reduzindo o custo da instalação, porém este tipo de sistema exige uma grande área para uma troca de calor adequada.

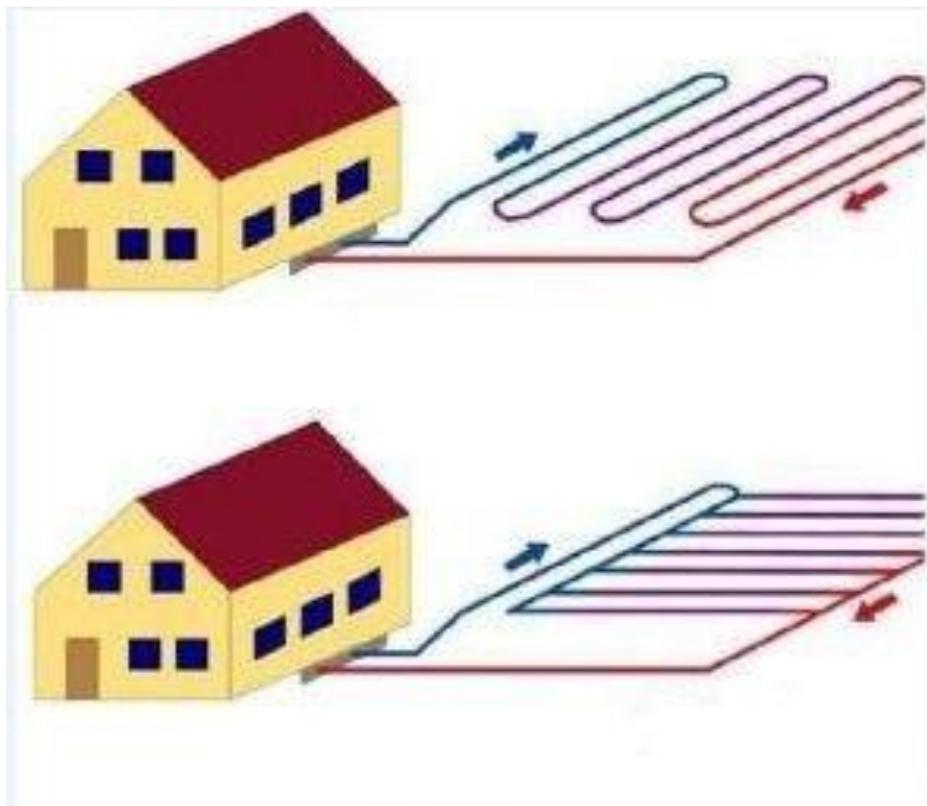


Figura 2.15 - Possíveis configurações para sistemas Fechados horizontais em série e paralelo.

Fonte: Sanner (2001)

Assim quando se opta por se aplicar um sistema horizontal fechado onde não se possui grande área, a configuração tipo “Slinky” é utilizada, nesta configuração o tubo é enrolado de modo a aumentar o comprimento total do sistema de troca de calor, de forma que o fluido permaneça mais tempo em contato com a fonte geotermal, como pode ser observado

esquemáticamente na Figura 2.16. Neste sistema tipicamente utiliza-se tubos de 19 a 38 milímetros de diâmetro com cerca de 122 a 183 metros de comprimento para se fazer o contato com a fonte geotérmica por tonelada de aquecimento ou capacidade de refrigeração que se deseja extrair, segundo Hernandez Neto e Voltani (2013).

Khan (2004) explica que este sistema apresenta características térmicas similares às de um sistema vertical, porém o sistema horizontal é mais afetado pelas flutuações de temperatura da camada acima da tubulação, gerando uma maior flutuação na temperatura do circuito podendo interferir no desempenho da bomba de calor, reduzindo a eficiência do sistema.

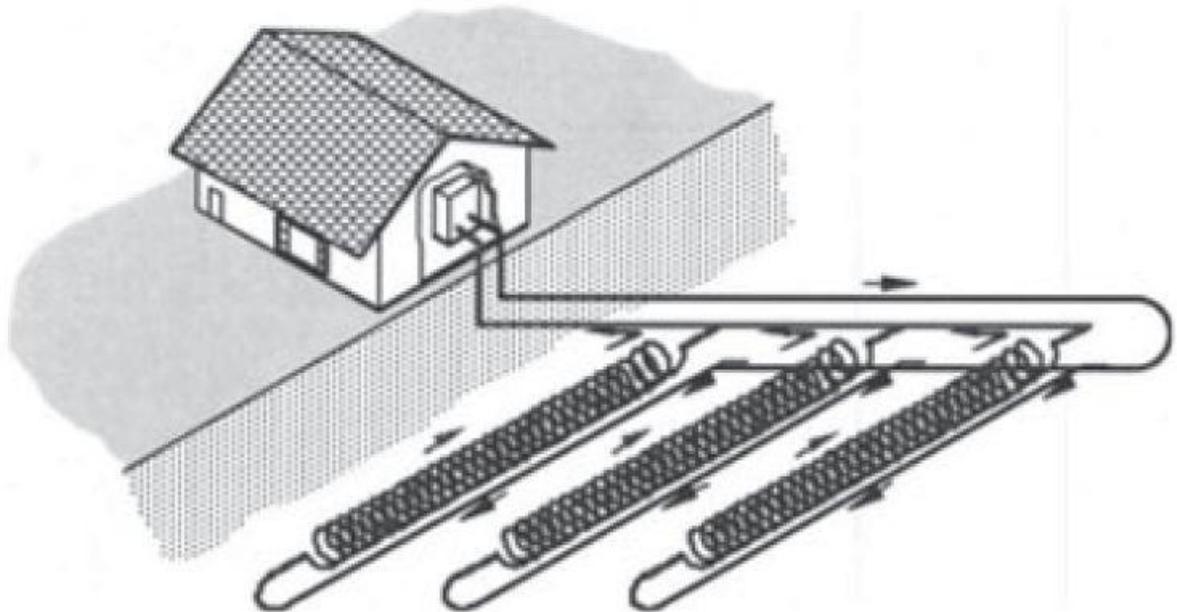


Figura 2.16 - Sistema horizontal fechado Slinky

Fonte: Botti (2016)

Desta maneira, as pesquisas sobre sistemas horizontais têm recebido menos atenção do que os verticais, segundo Hernandez Neto e Voltani (2013), e o fato que mais influencia essa preferência por sistemas verticais segundo este autor, é o fato de que este ocupa menos espaço, reduzindo então o custo de instalação para projetos de grande porte. Já Chiasson (1999) cita como vantagem do sistema horizontal o reconhecimento e caracterização do tipo de solo ser mais simplificado, permitindo um dimensionamento mais preciso das bombas de calor melhorando a eficiência do sistema. Spitler *et al.* (2010) em sua pesquisa apresentam um sistema misto entre sistema horizontal e vertical com a associação de poços com tubos

horizontais como é exemplificado na Figura 2.17 e ainda, de acordo com os mesmos autores, esta é a forma mais viável de ponto de vista econômico de se utilizar a fonte geotermal.



Figura 2.17 - Sistema fechado misto

Fonte: Sanner (2001)

2.3.1.2 Sistema de Ciclo Aberto (Open loop system)

Em uma mina subterrânea, após o encerramento das atividades, é comum a inundação, que pode ser proveniente de três fontes diferentes ou associação delas (águas da chuva, aquíferos interceptados pelo desenvolvimento da mina ou por bombeamento de água de lagos e rios na região). A infiltração da água pode ser pela permeabilidade natural, gerada pela composição e processos de formação geológica ou artificial, no qual a água flui pelas galerias abertas pelo homem como é o caso de uma mina subterrânea.

Assim uma mina subterrânea pode apresentar os 3 principais fatores para se tornar um excelente sistema geotermal de ciclo aberto, estes fatores são a temperatura, permeabilidade e presença de água. Segundo Ghoreishi- Madiseh *et al.* (2012) a enorme quantidade de água armazenada em uma mina inundada pode ser considerada um reservatório geotérmico com grande potencial para um futuro aproveitamento.

Em um sistema de ciclo aberto utilizam-se poços e bombas convencionais para a extração de água aquecida de uma fonte geotermal e a fornece para uma fonte dissipadora de calor, de forma direta ou ainda para abastecer uma bomba de calor. Khan (2004) alerta que dependendo da qualidade química da água é necessário considerar uma proteção contra corrosão para bomba de calor e após o uso desta água térmica, a mesma deve ser descartada em

um lugar adequado. Na Figura 2.18 pode-se ver um sistema de ciclo aberto simplificado onde a fonte de água é externo ao poço sendo bombeado de um lago próximo.

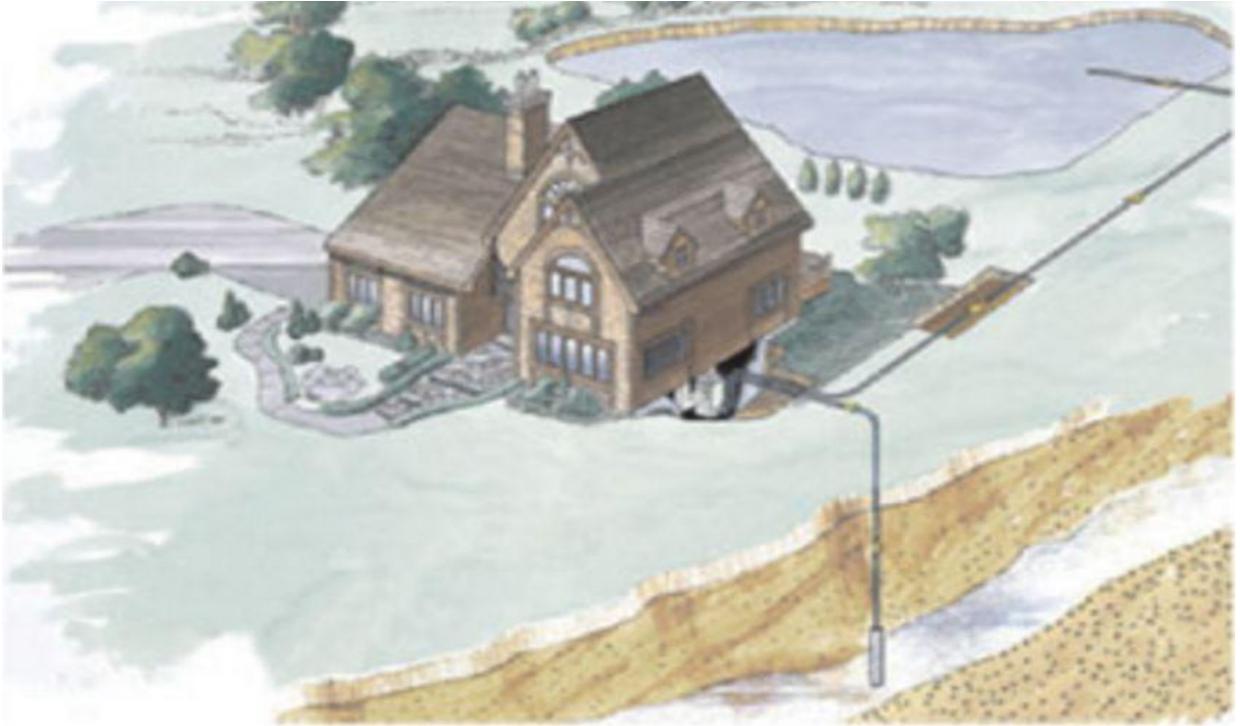


Figura 2.18 - Sistema de ciclo aberto

Fonte: BOTTI (2016)

Jim (2002) alerta que para este sistema, além de bom conhecimento do solo para se perfurar os poços nos locais de maior potencial, são necessários ensaios de qualidade de água para garantir a correta preservação dos materiais de tubulação e bomba. Chiasson (1999) fala sobre as vantagens do sistema como a sua simplicidade, o uso de pequenas áreas e consequente baixo custo de instalação em relação aos outros sistemas, e lista também as desvantagens, a pouca disponibilidade de fontes de rejeição de calor, a qualidade da água e as questões ambientais para a utilização das águas subterrâneas e a reinjeção no solo ou em outro aquífero.

Em um sistema aberto existem dois tipos de poços, o de injeção e o de produção. Como é possível observar no esquema da Figura 2.19, a água fria é inserida no poço de injeção e, após fluir lentamente pelas rochas permeáveis absorvendo o calor geotérmico das mesmas, esta é aquecida, recuperada no poço de produção, seguindo para uma bomba de calor. Após sua extração, esta água é reinjetada retornando ao ciclo. A produção e injeção podem ser feitas por um único poço como pode ser visto na Figura 2.20. Este método, conhecido como coluna de pé (Standing Column), é mais utilizada segundo Rafferty (2001), em locais de camadas rochosas

mais difíceis de se perfurar. Neste sistema há uma escassez de água de modo que apenas um poço é perfurado. Porém ainda segundo o mesmo o sistema de dois poços é mais eficiente energeticamente, tem menores custos e menores limitações geológicas de implementação, tornando assim este tipo de utilização mais atrativa.

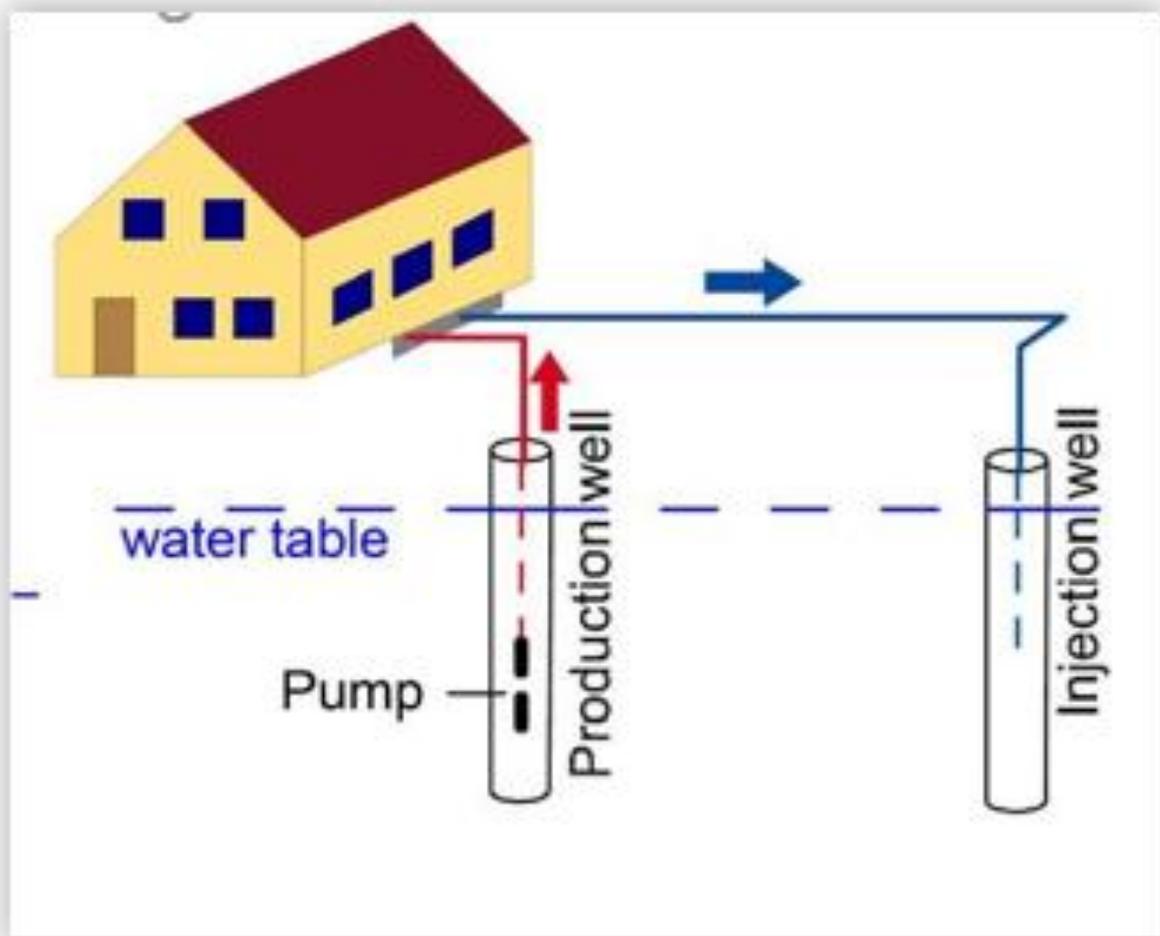


Figura 2.19 - Poços de produção e injeção

Fonte: Sanner (2001)

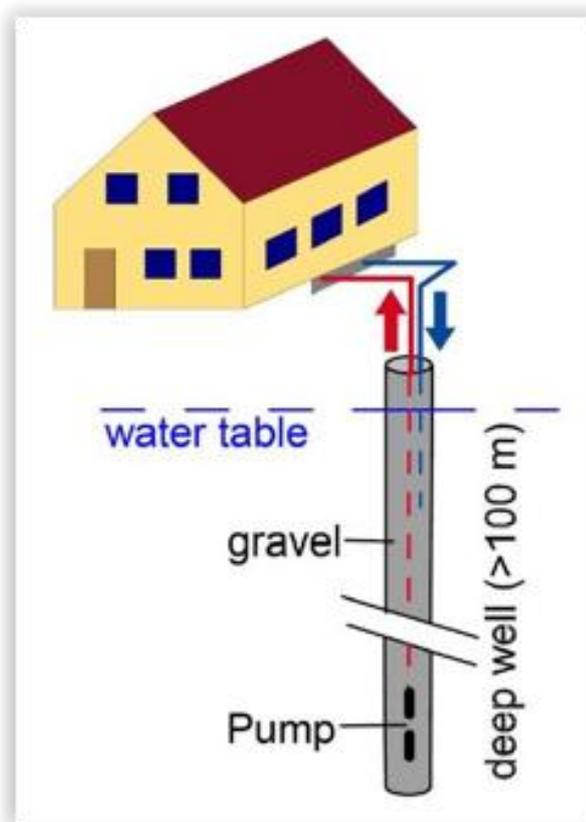


Figura 2.20 - Sistema aberto de coluna de pé (Standing Column)

Fonte: Sanner (2001)

Tendo em vista que os principais custos de implementação do sistema estão associados à abertura e manutenção dos poços, surge a ideia de se utilizar as aberturas já existentes de uma mina subterrânea para implementação do sistema de forma a viabilizar economicamente o uso deste tipo de energia renovável e ainda dando um novo uso para a área minerada após o encerramento das atividades.

Uma galeria poderia ser utilizada como ligação entre poços de produção e injeção por onde a água fluiria com uma resistência hidrogeológica muito menor formando uma espécie de sistema de vasos comunicantes cuja velocidade do fluxo seria definida pela taxa de produção e injeção de modo que acaba por facilitar o dimensionamento das bombas de calor, pois seria possível manter um ΔT (variação de temperatura) constante a partir do controle do fluxo dentro do sistema. Segundo Ghoreishi- Madiseh *et al.* (2012) o sucesso da aplicação do sistema aberto em algumas minas abandonadas tem atraído cada vez mais atenção e trabalhos vem sendo desenvolvidos com o objetivo de viabilizar este sistema em larga escala de extração de calor.

Rafferty (1995) considera que este tipo de sistema é a melhor opção para uso comercial uma vez que é possível se extrair uma grande quantidade de água aquecida de um único poço com um custo relativamente baixo, porém também cita alguns pontos limitantes do sistema aberto como a necessidade de uma fonte de água próxima, o controle da qualidade da água, as leis ambientais de utilização da água da região e problemas com o bombeamento em poços mal desenvolvidos.

2.4 Análise do uso de Galerias de Minas Subterrâneas como Fonte Geotérmica

O fechamento de uma mina cria impactos sociais, econômicos e ambientais negativos na região onde o empreendimento se encontra e, mesmo com as minas subterrâneas apresentando um alto potencial para serem utilizadas na produção de energia geotérmica de baixa entalpia, apenas algumas minas na Europa, Canada, USA e China vem sendo utilizadas para tal fim, segundo Rodriguez e Aguado (2014). Esta energia de baixa entalpia (menor que 150°C) é geralmente utilizada no aquecimento de residências, piscinas, pisciculturas, estufas ou mesmo em processos industriais com o auxílio de bombas de calor e vem sendo cada vez mais estudada na busca de aperfeiçoar o aproveitamento de fontes renováveis de energia. Na Figura 2.21 pode-se ver simplificada um sistema aberto de aquecimento de uma residência utilizando poços distintos para injeção e produção.

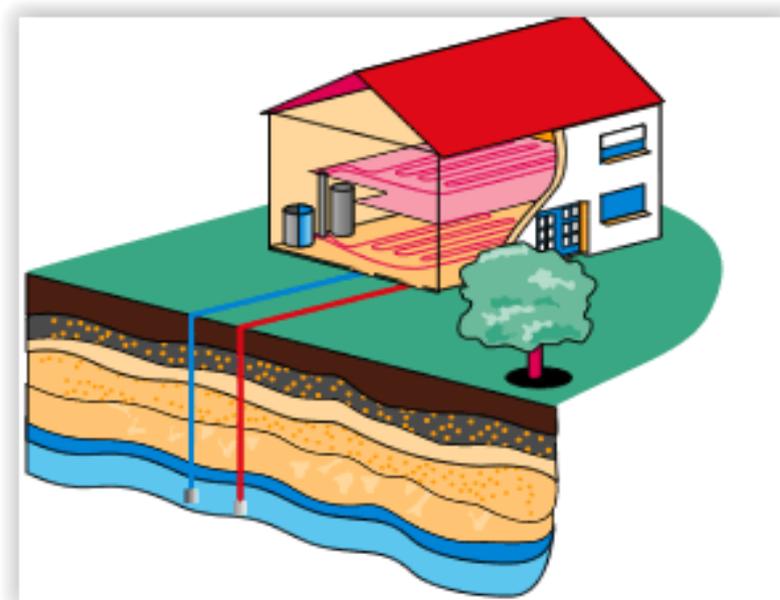


Figura 2.21 - Sistema aberto de aquecimento de residências

Fonte: Best Geotermia (2016)

O uso de minas subterrâneas para gerar energia geotérmica começou no Canadá nos anos 80 e na Figura 2.22 é possível ter uma ideia de como poderia ser feito o aproveitamento geotérmico de ciclo aberto de uma mina subterrânea, no qual em azul temos um poço de injeção e em vermelho o poço de produção. Rodrigues e Díaz (2009) afirmam que este sistema pode gerar 215 KW utilizando 20 m³ de água, em uma mina de cerca de 500 metros de profundidade, segundo os mesmos, esta quantidade de energia é capaz de ajudar como uma matriz energética auxiliar.

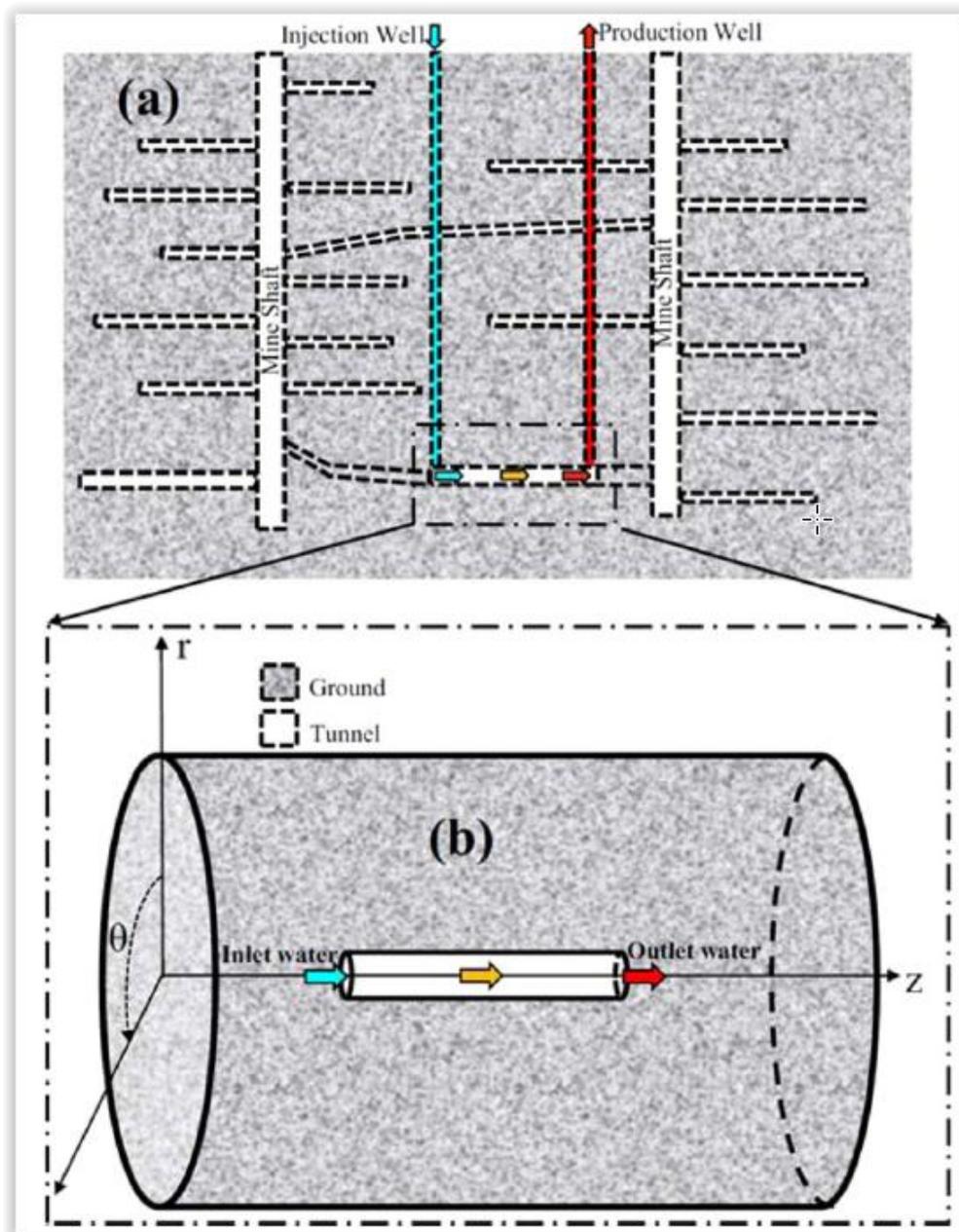


Figura 2.22 - Sistema geotérmico em mina subterrânea

Fonte: Ghoreishi- Madiseh *et al.* (2012)

Um dos projetos pioneiros foi Springhill na Nova Escócia, cujo projeto vem sendo discutido e estudado em várias publicações. Neste projeto foi utilizada uma mina de carvão abandonada para fazer a climatização de uma fábrica de plásticos com aproximadamente 14.000 m² com um sistema aberto, demonstrado na Figura 2.23, no qual o poço de produção, com cerca de 140 metros de profundidade, bombeia cerca 240 L/min de água aquecida da mina com em média 18 °C e alimenta um sistema de 11 bombas de calor que aquecem a fábrica no inverno e refrigera no verão. Após passar pelo sistema, a água é reinjetada na mina por um poço de injeção de 30 metros de profundidade, a 13 °C no inverno e 25 °C verão. Desta forma, com o uso deste sistema a empresa economiza em média US \$ 160.000 por ano, se comparado ao sistema movido a óleo, conforme Watzlaf e Ackman (2006); Jessop *et al* (1995).

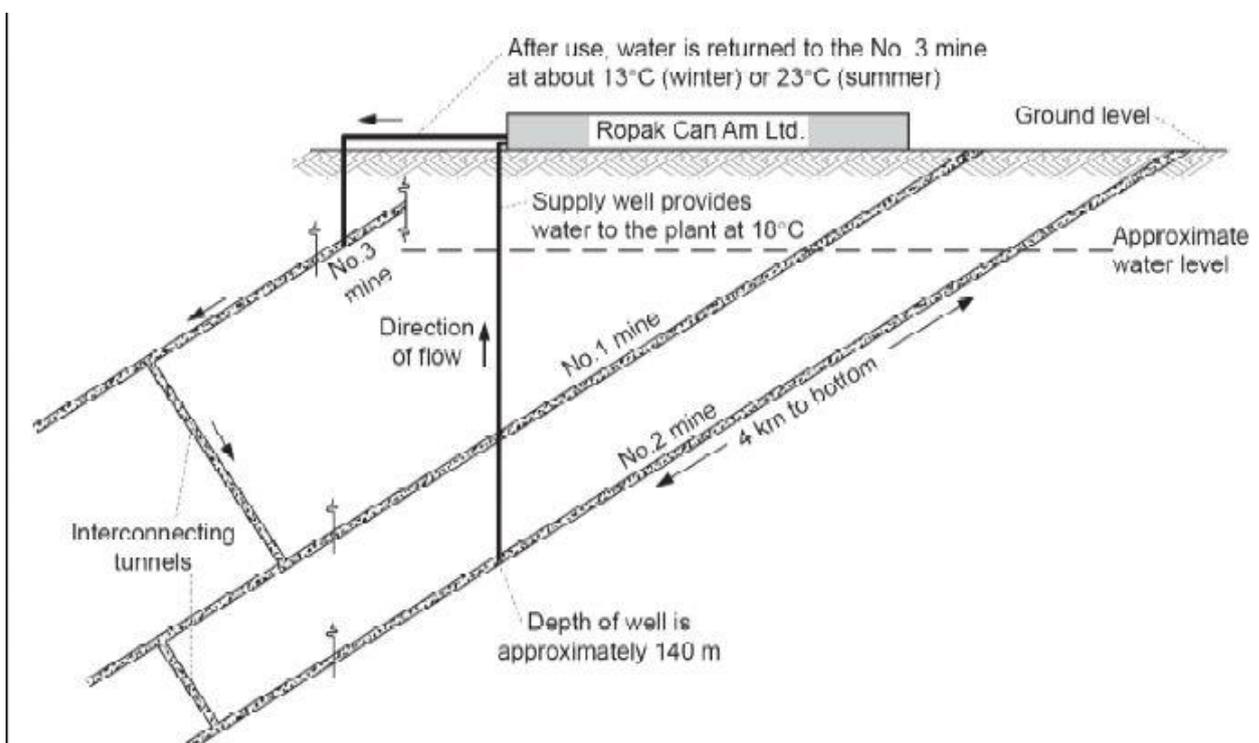


Figura 2.23 - Projeto Springhill, Nova Escócia, Canadá

Fonte: Abbasy (2013)

Como este projeto é de pequena escala, problemas de sustentabilidade não foram levantados. Porém em casos em que há maiores demandas energéticas certas complicações devem ser levadas em conta, como a incerteza geométrica das galerias subterrâneas e dos caminhos do fluxo de água, bem como o comportamento térmico do recurso ao longo do ciclo de vida do projeto. Assim Rodrigues e Díaz (2009), pensando em conseguir definir o potencial do recurso a ser utilizado de forma a não prejudicar a sustentabilidade do recurso geotérmico,

desenvolveram um método semi-empírico para avaliar a capacidade geotérmica das galerias de mina subterrânea, neste trabalho ele utilizou certas simplificações para estimar estes potenciais como, por exemplo, a geometria das galerias onde foram adotadas como regulares, como ilustra a Figura 2.24.

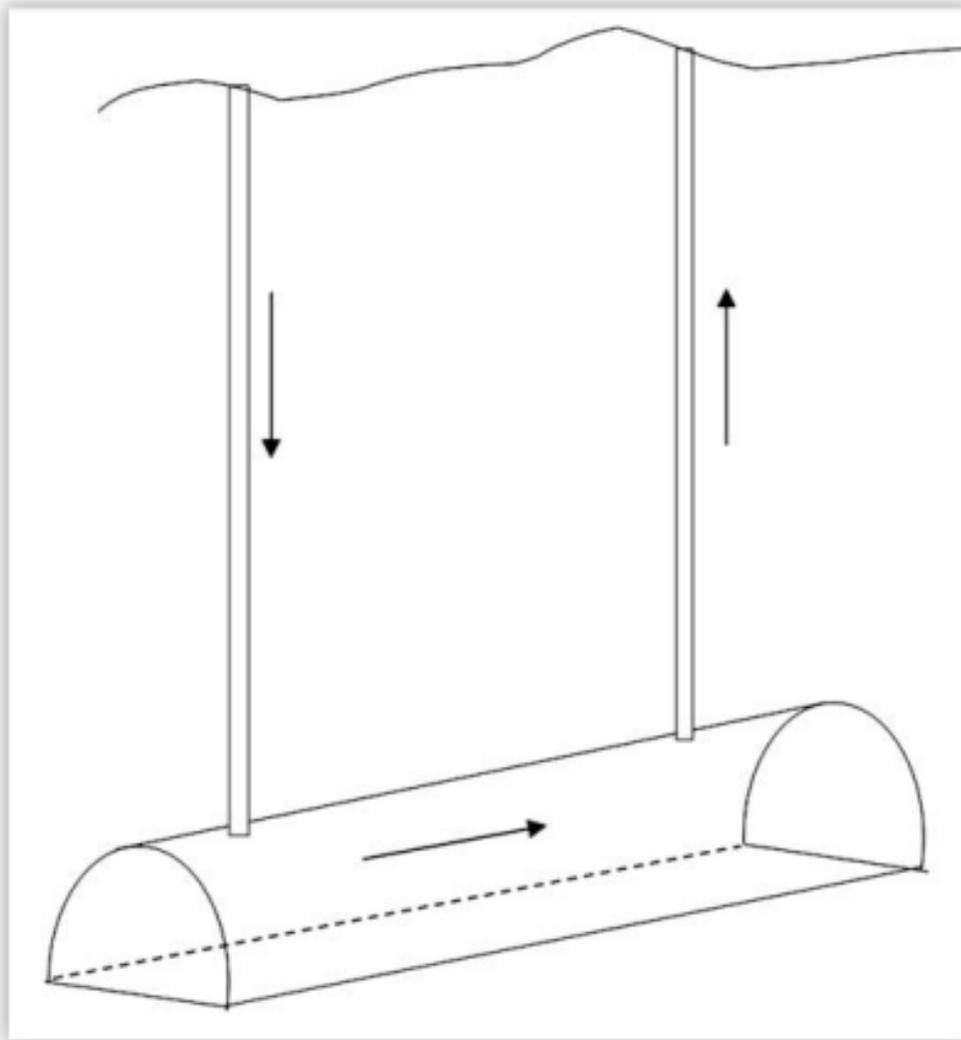


Figura 2.24 - Esquema geométrico simplificado das galerias e poços

Fonte: Rodrigues e Díaz (2009).

A partir destas simplificações foi possível elaborar cálculos e gráficos onde se relacionavam fatores importantes para se definir a quantidade ótima de energia utilizável de forma a não afetar tanto o recurso energético. No gráfico da Figura 2.25, Rodrigues e Díaz (2009) relacionam a temperatura da água com a distância percorrida por ela nas galerias, enquanto na Figura 2.26, analisou-se o volume de fluxo de água em metros cúbicos por hora (m^3/h) com o ganho energético em quilowatts (kW) e relacionou-se também com o ganho de temperatura em Celsius ($^{\circ}C$).

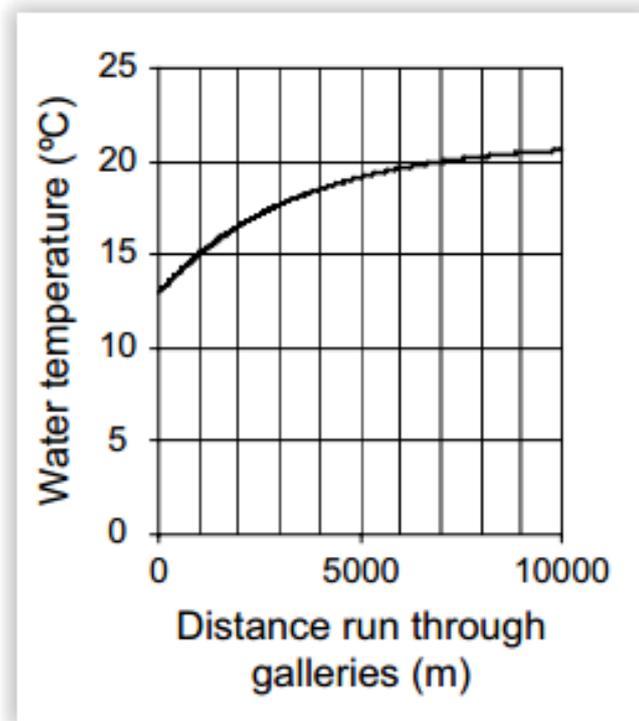


Figura 2.25 - Gráfico de relação entre a temperatura da água em Celsius pela distância em metros percorrida por ela em uma galeria

Fonte: Rodrigues e Díaz (2009).

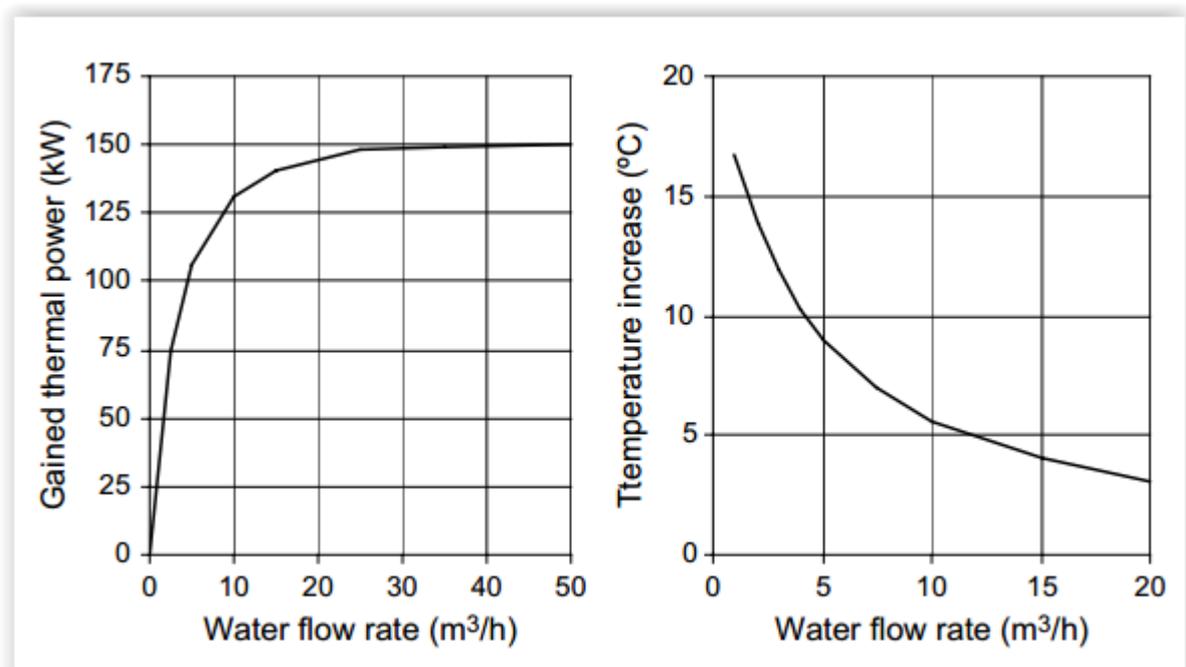


Figura 2.26 - Gráficos de relação entre a taxa de fluxo de água em metros cúbicos por hora pelo ganho de temperatura e ganho energético em quilowatt

Fonte: Rodrigues e Díaz (2009).

Por fim autores analisaram também a energia termal obtida com o tempo em anos, em que “m” é o número de meses de funcionamento do sistema, onde fica claro a redução do potencial energético se o uso for intenso e mal dimensionado, Figura 2.27.

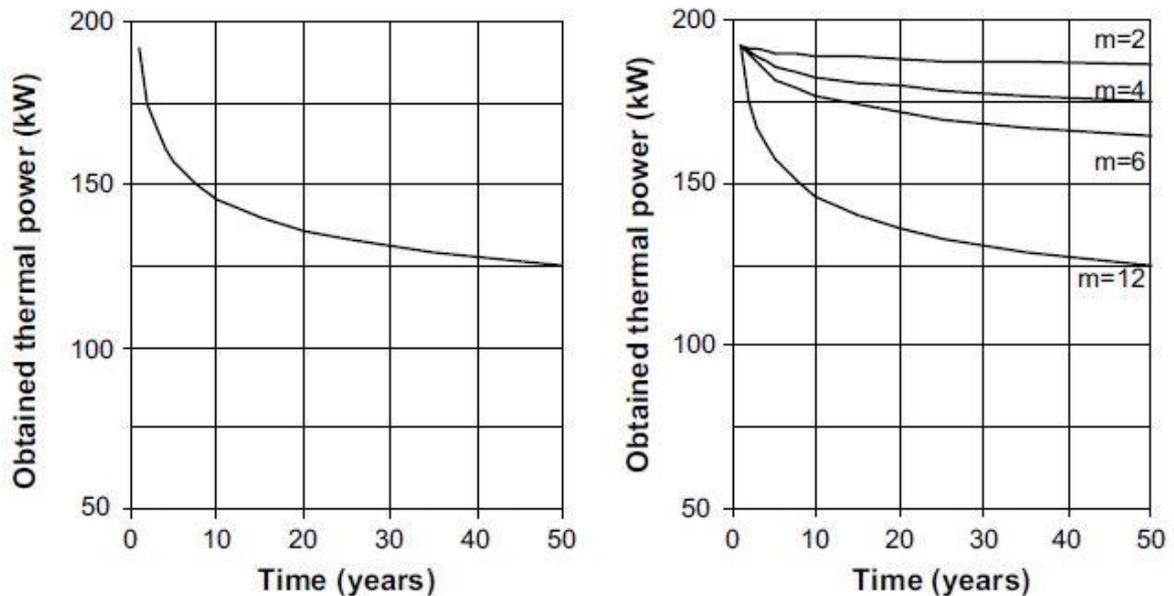


Figura 2.27 - Gráficos de relação entre energia termal obtida em quilowatt pelo tempo em anos, onde m é o número de meses de funcionamento de sistema

Fonte: Rodrigues e Díaz (2009).

Abbassy (2013) em seu trabalho visitou 12 minas subterrâneas (maioria lavrando em realce em subníveis, produções entre 3.755 e 8.000 t/dia), ainda ativas durante a estação do inverno dos anos 2010-2013 para estudar a aplicação de sistemas de ciclo aberto nas mesmas. Para preservar os nomes das mineradoras ele as identificou com algarismos romanos, dividindo sua pesquisa em três áreas diferentes do Canadá da seguinte forma: minas I-VI - região de Sudbury, Ontario, minas VII-IX - região Val-d' Or, Quebec e as minas X-XII localizadas em Thompson, Manitoba. Todas as 12 minas bombeavam água das minas como parte de sua operação, assim os estudos foram baseados em dados operacionais e volumes bombeados normalmente de água medido em metros cúbicos por segundo (m^3/s). Após coleta dos dados foram comparados fatores como as reduções de custos, tempo de retorno e reduções de emissão de dióxido de carbono (CO_2) usando como base um $\Delta T=5\text{ }^\circ C$ (variação de temperatura que apresentou melhores resultados nos estudos de caso). Assim foram comparados os dados obtidos com sistemas convencionais elétricos e a gás natural, levando em conta especificações da bomba de calor WW-420 e vazões médias mínimas de bombeamento.

Os dados obtidos pelo mesmo bem como os dados básicos das minas estão listados a seguir:

Mina I: mina de níquel em operação desde 1969 pelo método VCR (Vertical Crater Retreat) e possui conexão com a Mina II a 730 metros. As estações de bombeamento usualmente bombeiam 0,043 a 0,069 m³/s nos níveis 670, 915 e 1.220 metros com temperatura média da água de descarte de 15,1 °C. Utilizando este potencial seria capaz de gerar 1 a 3 MW de calor, quantia essa que poderia economizar uma média de US \$ 325 mil a 1 milhão /ano. Na Tabela 2.1 estão relacionados fatores econômicos e ambientais da Mina I usando nove bombas de calor.

Tabela 2.1 - Comparação dos dados obtidos da Mina I com sistemas convencionais.

Mina I	Comparado com sistema elétrico		
Ganho de calor (kW)	Economia anual (US\$/ano)	Tempo de retorno (ano)	Redução de CO ₂ (t/ano)
1.144	324.347	0,8	1.501
	Comparado com sistema de gás natural		
	Economia anual (US\$/ano)	Tempo de retorno (ano)	Redução de CO ₂ (t/ano)
	26.813	9,9	1.059

Fonte: Abbasy (2013) Adaptada.

Mina II: mina de níquel com o eixo principal de extração fechado em 2009 e atualmente operando em extração seletiva a partir do nível 730 metros, nível este compartilhado com a Mina I. Com as estações de bombeamento a 700 e 1.220 metros e cones de decantação a 1.198 e 686 metros com volumes de bombeamento entre 0,034 a 0,084 m³/s dependente da condição climática. A temperatura de descarte médio 14,6°C, possui potencial para produzir 600 kW a 3,5 MW de calor suficientes para economizar de US \$200.000 a 1,2 milhão de dólares/ano em custos de climatização da mina. Na Tabela 2.2 estão relacionados fatores econômicos e ambientais da Mina II usando sete bombas de calor.

Tabela 2.2 - Comparação dos dados obtidos da Mina II com sistemas convencionais.

Mina II	Comparado com sistema elétrico		
Ganho de calor (kW)	Economia anual (US\$/ano)	Tempo de retorno (ano)	Redução de CO ₂ (t/ano)
763	216.231	0,8	100
	Comparado com sistema de gás natural		
	Economia anual (US\$/ano)	Tempo de retorno (ano)	Redução de CO ₂ (t/ano)
	17.875	9,9	706

Fonte: Abbasy (2013) Adaptada.

Mina III: mina de níquel há mais de 100 anos de extração, com operações a 1.555 metros de profundidade, possui estações de bombeamento a 1220, 914 e 315 metros com vazão média de 0,035 m³/s e máxima de 0,050 m³/s com temperatura média de 15,8°C. Este sistema é capaz de gerar 650 kW a 2 MW, suficientes para economizar entre US \$ 300.000 a \$ 800.000 dólares/ano. Na Tabela 2.3 estão relacionados fatores econômicos e ambientais da Mina III de um sistema com sete bombas de calor.

Tabela 2.3 - Comparação dos dados obtidos da Mina III com sistemas convencionais.

Mina III	Comparado com sistema elétrico		
Ganho de calor(kW)	Economia anual (US\$/ano)	Tempo de retorno (ano)	Redução de CO ₂ (t/ano)
890	252.270	0,8	1.167
	Comparado com sistema de gás natural		
	Economia anual (US\$/ano)	Tempo de retorno (ano)	Redução de CO ₂ (t/ano)
	20.854	9,9	823

Fonte: Abbasy (2013) Adaptada

Mina IV: mina de níquel que iniciou suas operações em 1901 com extração a céu aberto, sendo hoje a mina subterrânea de níquel mais profunda do Canadá com produção de 3.755 toneladas/dia, é também uma das mais quentes do Canadá com temperaturas por volta de 40 °C nos níveis mais profundos. Possui um extenso sistema de bombeamento com estações localizadas nas profundidades de 2.380, 2.340, 2.255, 2.134, 1.646, 1.158 e 580 metros que bombeiam em média 0,040 m³/s e máximo de 0,081 m³/s. A temperatura de descarga é em média 14 °C, 9 °C a menos que no nível 1.160 metros, essa perda de energia está associada ao fato dos tubos que conduzem a água passarem por um antigo poço onde ocorre um acúmulo de gelo durante todo ano, assim para um melhor aproveitamento, um isolamento térmico seria necessário para as tubulações. Estima-se o potencial de 900kW a 3,5 MW podendo ser capaz de economizar US \$400.000 a 1,2 milhões de dólares/ano. Na Tabela 2.4 estão relacionados fatores econômicos e ambientais da Mina IV usando oito bombas de calor.

Tabela 2.4 - Comparação dos dados obtidos da Mina IV com sistemas convencionais.

Mina IV	Comparado com sistema elétrico		
Ganho de calor(kW)	Economia anual (US\$/ano)	Tempo de retorno (ano)	Redução de CO ₂ (t/ano)
1.019	288.907	0,8	1.337
	Comparado com sistema de gás natural		
	Economia anual (US\$/ano)	Tempo de retorno (ano)	Redução de CO ₂ (t/ano)
	23.884	9,9	943

Fonte: Abbasy (2013) Adaptada

MINA V: a extração desta mina começou no início de 1.900 com extração a céu aberto e depois por fatores econômicos passou a operar em extração subterrânea nos anos 20, como principal produto temos o níquel, e como subprodutos, cobre, cobalto e metais preciosos. Esta mina possui conexão com três outras minas subterrâneas abandonadas. Com estações de bombeamento localizadas a profundidades de 1.189, 732 e 488 metros, parte da vazão média de 0,048 m³/s e máxima 0,210 m³/s é desviada no nível 732 metros para ser armazenada nas três minas subterrâneas abandonadas a qual está é conectada. A temperatura média de descarga é de 13 °C, o que é relativamente baixa porém podem oferecer 1,1 a 9 MW de calor sendo capaz de gerar uma economia de US \$600.000 a 3,2 milhões de dólares/ano. Na Tabela 2.5 estão relacionados fatores econômicos e ambientais da Mina V usando dez bombas de calor.

Tabela 2.5 - Comparação dos dados obtidos da Mina V com sistemas convencionais.

Mina V	Comparado com sistema elétrico		
Ganho de calor(kW)	Economia anual (US\$/ano)	Tempo de retorno (ano)	Redução de CO ₂ (t/ano)
1.271	360.385	0,8	1.667
	Comparado com sistema de gás natural		
	Economia anual (US\$/ano)	Tempo de retorno (ano)	Redução de CO ₂ (t/ano)
	29.792	9,9	1.176

Fonte: Abbasy (2013) Adaptada

MINAS VI: mina subterrânea de níquel com cobre e metais do grupo da platina como subprodutos, extraíndo 5.000 t/dia de dois corpos de minério (A e B) utilizando uma mesma infraestrutura com corpos interligados por rampa com um complexo sistema de desaguamento. As estações de bombeamento estão a profundidade de 1.507, 1.466, 1.387 e 1.273 metros em A e nos níveis 1.333, 1.285, 1.222, 1.219 e 1.167 metros em B, no qual estes fluxos são direcionados para estações principais de bombeamento a 1.149, 1.039, 1.027 e 594 metros e depois para um lago de tratamento de água na superfície com uma vazão média de 0,031 a 0,044 m³/s. A temperatura de descarte da água na superfície é de 16,7 °C com um potencial de produzir 600 kW a 1,8 MW de calor, o suficiente para gerar economias de \$250.000 a \$700.000 dólares/ano. Na Tabela 2.6 estão relacionados fatores econômicos e ambientais da Mina VI usando sete bombas de calor.

Tabela 2.6 - Comparação dos dados obtidos da Mina VI com sistemas convencionais.

Mina VI	Comparado com sistema elétrico		
Ganho de calor(kW)	Economia anual (US\$/ano)	Tempo de retorno (ano)	Redução de CO ₂ (t/ano)
890	252.270	0,8	1.167
	Comparado com sistema de gás natural		
	Economia anual (US\$/ano)	Tempo de retorno (ano)	Redução de CO ₂ (t/ano)
	20.854	9,9	823

Fonte: Abbasy (2013) Adaptada

MINA VII: uma pequena mina cuja produção iniciou-se em 2008 pelo método realce em subníveis (Longhole Open Stoping) e produz hoje 8.000 t/dia de minério. Porém, mesmo sendo uma mina pequena a mesma possui uma grande quantidade de água e seu sistema de desaguamento possui uma certa complexidade, com as principais estações de bombeamento nos níveis 810, 800, 730 e 380 metros. São bombeados da mina 0,060 m³/s com picos de 0,072 m³/s de água com temperatura média de 16,5°C, capaz de oferecer de 1 a 3 MW de calor e gerar uma economia de \$300.000 a \$800.000 dólares/ano. Na Tabela 2.7 estão relacionados fatores econômicos e ambientais da Mina VII usando doze bombas de calor.

Tabela 2.7 - Comparação dos dados obtidos da Mina VII com sistemas convencionais.

Mina VII	Comparado com sistema elétrico		
Ganho de calor(kW)	Economia anual (US\$/ano)	Tempo de retorno (ano)	Redução de CO ₂ (t/ano)
1.525	299.840	1,2	320
	Comparado com sistema de gás natural		
	Economia anual (US\$/ano)	Tempo de retorno (ano)	Redução de CO ₂ (t/ano)
	247.561	1,4	1.412

Fonte: Abbasy (2013) Adaptada

MINA VIII: mina com operação em realce em subníveis, longitudinal ou transversal, em recuo, com enchimento. Suas estações de bombeamento estão nos níveis 1.280, 1.250, 770 e 490 metros e bombeiam de 0,022 a 0,025 m³/s. A temperatura da água de descarte é em média 16,7 °C na superfície com um potencial de produzir 900 kW a 3,5 MW de calor para esse empreendimento gerando uma economia de \$120.000 a \$270.000 dólares/ano. Na Tabela 2.8 estão relacionados fatores econômicos e ambientais da Mina VIII usando cinco bombas de calor.

Tabela 2.8 - Comparação dos dados obtidos da Mina VIII com sistemas convencionais.

Mina VIII	Comparado com sistema elétrico		
Ganho de calor(kW)	Economia anual (US\$/ano)	Tempo de retorno (ano)	Redução de CO ₂ (t/ano)
636	124.934	1,2	134
	Comparado com sistema de gás natural		
	Economia anual (US\$/ano)	Tempo de retorno (ano)	Redução de CO ₂ (t/ano)
	103.150	1,4	508

Fonte: Abbasy (2013) Adaptada

MINA IX: mina de ouro com subprodutos de prata, cobre, chumbo e zinco em operação desde 1988. Com uma produção de 7.200 t/dia pelo método realce em subníveis, longitudinal ou transversal, em recuo, com enchimento não consolidado e com cimento no nível mais profundo a 3100 metros. As estações do bombeamento estão nos níveis 2.330, 2.240, 2.200, 1.700, 1.220 e 230 metros com vazão total de 0,019 a 0,021 m³/s de água a uma temperatura de 22°C e o uso desta energia para climatização da mina poderia gerar de 400 a 900 kW, capaz de gerar uma economia de \$100.000 a \$200.000 dólares/ano para a mina. Na Tabela 2.9 estão relacionados fatores econômicos e ambientais da Mina IX usando quatro bombas de calor.

Tabela 2.9 - Comparação dos dados obtidos da Mina IX com sistemas convencionais.

Mina IX	Comparado com sistema elétrico		
Ganho de calor(kW)	Economia anual (US\$/ano)	Tempo de retorno (ano)	Redução de CO ₂ (t/ano)
574	117.160	1,0	107
	Comparado com sistema de gás natural		
	Economia anual (US\$/ano)	Tempo de retorno (ano)	Redução de CO ₂ (t/ano)
	92.624	1,3	531

Fonte: Abbasy (2013) Adaptada

MINA X: mina utilizando método VBM (Vertical Block Mining) e corte e enchimento. Possui uma rede de drenagem que começa no nível 1.200 metros, cuja drenagem passa pelo nível 1225 metros sendo bombeada para uma estação de bombeamento a 710 metros e então para a superfície. Com um fluxo de água no interior da mina inconstante, uma vazão média de 0,007 m³/s é bombeada para fora da mina a uma temperatura de 16,6 °C. Com o aproveitamento desta energia seria criado um potencial de 180 a 350 kW, sendo possível economizar de \$30.000 a \$60.000 dólares/ano. Na Tabela 2.10 estão relacionados fatores econômicos e ambientais da Mina X usando duas bombas de calor.

Tabela 2.10 - Comparação dos dados obtidos da Mina X com sistemas convencionais.

Mina X	Comparado com sistema elétrico		
Ganho de calor(kW)	Economia anual (US\$/ano)	Tempo de retorno (ano)	Redução de CO ₂ (t/ano)
254	33.636	1,8	13
	Comparado com sistema de gás natural		
	Economia anual (US\$/ano)	Tempo de retorno (ano)	Redução de CO ₂ (t/ano)
	70.836	0,8	269

Fonte: Abbasy (2013) Adaptada

MINA XI: as minas XI e XII possuem corpos de minérios interconectados no subsolo porém possuem duas sedes e operações distintas. O desaguamento se inicia no nível 1.245 metros sendo bombeado do nível 500 metros em que parte da água é bombeada para o nível 610 metros podendo seguir para a superfície ou para a diluição de lama. Em média são bombeados 0,043 m³/s com pico máximo de 0,054 m³/s a uma temperatura de 14 °C, um potencial de geração de 960 kW a 1,9 MW de calor suficientes para gerar uma economia de \$100.000 a \$250.000 dólares/ano. Na Tabela 2.11 estão relacionados fatores econômicos e ambientais da Mina XI usando nove bombas de calor.

Tabela 2.11 - Comparação dos dados obtidos da Mina XI com sistemas convencionais.

Mina XI	Comparado com sistema elétrico		
Ganho de calor(kW)	Economia anual (US\$/ano)	Tempo de retorno (ano)	Redução de CO ₂ (t/ano)
1.144	151.362	1,8	58
	Comparado com sistema de gás natural		
	Economia anual (US\$/ano)	Tempo de retorno (ano)	Redução de CO ₂ (t/ano)
	318.763	0,8	1.211

Fonte: Abbasy (2013) Adaptada

MINA XII: mina em operação desde 1961 com atividades a 1.280 metros de profundidade. Seu sistema de desaguamento tem o nível mais profundo a 1.268 metros, no qual bombeia em média 0,009 m³/s, porém toda água do nível 730 metros ou acima é bombeada para a mina XI. A temperatura média da água de descarte na superfície é de 13,6 °C, capaz de gerar um potencial de 190 a 380 kW sendo possível economizar \$25.000 a \$70.000 dólares/ano com climatização da mina. Na Tabela 2.12 estão relacionados fatores econômicos e ambientais da Mina XII usando duas bombas de calor.

Tabela 2.12 - Comparação dos dados obtidos da Mina XII com sistemas convencionais.

Mina XII	Comparado com sistema elétrico		
Ganho de calor(kW)	Economia anual (US\$/ano)	Tempo de retorno (ano)	Redução de CO ₂ (t/ano)
254	33.636	1,8	13
	Comparado com sistema de gás natural		
	Economia anual (US\$/ano)	Tempo de retorno (ano)	Redução de CO ₂ (t/ano)
	70.836	0,8	269

Fonte: Abbasy (2013) Adaptada.

Após análise das 12 minas, Abbassy (2013) concluiu que o uso de água de minas subterrâneas poderia gerar benefícios para as empresas. Concluiu-se também que a magnitude destes benefícios depende da localização, principais fontes energéticas, custos da fonte energética e as condições meteorológicas da região. Cita também que a aplicação do sistema de ciclo aberto na mina ainda ativa geraria uma perturbação mínima nas operações das mesmas, o que poderia encorajar os empresários a instalar o sistema em suas minas. Na Tabela 2.13 é apresentado um resumo baseado na energia elétrica como fonte energética de comparação, uma vez que esta é a mais largamente utilizada.

Tabela 2.13 - Resumo final das análises das 12 minas em comparação a sistemas elétricos.

Mina	Profundidade máxima de bombeamento(m)	Taxa de bombeamento (m ³ /s)	Temperatura da água (°C)	Ganho de calor (kW)	Tempo de retorno (anos)	Economia anual (US\$)
I	1.220	0,043	15,1	1.144	0,8	324.347
II	1.220	0,034	14,6	763	0,8	216.231
III	1.555	0,035	15,8	890	0,8	252.270
IV	2.380	0,040	14,0	1.019	0,8	288.907
V	1.189	0,048	13,0	1.271	0,8	360.385
VI	1.507	0,031	16,7	890	0,8	252.270
VII	810	0,060	16,5	1.525	1,2	299.840
VIII	1.280	0,022	16,7	636	1,2	124.934
IX	3.100	0,019	22,0	574	1,2	117.160
X	1.225	0,008	16,6	254	1,8	33.636
XI	1.245	0,043	14,0	1.144	1,8	151.362
XII	1.280	0,009	13,6	254	1,8	33.636

Fonte: Abbasy (2013) Adaptada

Existem outros projetos pelo mundo de pequena e grande escala, nos quais utilizam-se com sucesso as águas de minas subterrâneas para a implementação de sistemas geotérmicos, como é o caso da mina Wismut na Alemanha, que gera 690 kW. Entretanto o maior e mais promissor projeto do mundo é o Heerlen na Holanda, cujo abastecimento abrange 350

residências, 3.800 m² de espaço comercial e 16.200 m² de edifícios comunitários são aquecidos e resfriados com a água de uma mina abandonada de carvão, cita Abbasy (2013).

2.5 Discussões

Empreendimentos minerários, quando encerram suas atividades e executam seus planos de fechamento de mina em busca da recuperação e/ou novo uso da área minerada, se deparam com vários problemas uma vez que estes fechamentos estão frequentemente associados com passivos ambientais duradouros que envolvem custos significativos por décadas após o descomissionamento da área. Portanto, neste trabalho, é abordada uma nova possibilidade para um plano de fechamento de uma mina subterrânea dando a ela um novo uso como fonte geotérmica, no qual pode ser executado juntamente com a fase produtiva da mina, fase esta que o empreendimento está capitalizado, facilitando o cumprimento do plano de fechamento e ainda beneficiando as comunidades próximas da atividade da mina, fornecendo a estas uma “energia limpa” gerada a baixo custo, ajudando a reduzir o impacto econômico e social gerado com o encerramento das atividades minerárias da região.

Uma mina subterrânea possui uma rede de poços, túneis e galerias que geralmente, após o encerramento das atividades de extração, são inundadas como parte do plano de fechamento das mesmas. Estas minas inundadas apresentam três fatores importantes que são calor, permeabilidade e a presença de água, requisitos necessários para se caracterizar um recurso geotérmico, como foi citado por Ghoreishi- Madiseh *et al.* (2012). Neste contexto surge a viabilidade do uso das minas subterrâneas para se gerar energia, uma vez que a parte mais onerosa de se construir um sistema de aproveitamento geotermal, que é a perfuração dos poços, já se encontra feita.

Assim, a retirada de calor das águas de mina pode ajudar a melhorar a sustentabilidade das atividades minerárias, tendo em vista que esta energia tem um potencial para criar um impacto social positivo nas comunidades próximas as áreas mineradas, afirma Demollin-Schneiders *et al* (2005). A energia geotérmica gerada em mina subterrânea é capaz, de acordo com Watzlaf e Ackman (2006), de reduzir cerca de 67% o consumo de energia no aquecimento e 50% no resfriamento se comparado aos métodos convencionais de queima de óleo.

Deve-se então encarar esta forma de geração de energia como um auxiliar de uma matriz energética, diminuindo a queima de combustíveis fósseis e conseqüentemente a emissão de gases do efeito estufa, levando em conta que, segundo Dickson e Fanelli (2004), a combustão

de carvão, petróleo e gás liberam respectivamente na atmosfera 1042 g/kWh, 906 g/kWh, 453 g/kWh de CO₂, enquanto a energia geotérmica libera 13 a 380 g/kWh de CO₂ por energia elétrica produzida.

Os trabalhos relatados nessa pesquisa foram apenas um passo diante da gama de possibilidades de usos e modos de utilização, uma vez que o sistema possui certa flexibilidade, podendo ser instalado enquanto a mina está em atividade. Além deste, temos os sistemas de ciclo fechado que, apesar de serem promissores para ser utilizados, existem poucas pesquisas nas suas aplicações, Abbasy *et al.* (2011) cita como uso promissor para sistemas fechados, minas com extração em corte e enchimento e em barragens de rejeitos.

Como já é problematizado no trabalho de Souza (2014), o Brasil não tem um real controle de toda a sua extração mineral, fato este que, segundo os dados do Ministério de Minas e Energia (2010), no Brasil tinha, em 2007, 47 minas registradas por meio de lavra subterrânea (exclusivas, mais 17 mistas), informação esta que foi comprovada incompleta. Em um processo judicial no estado de Santa Catarina, em que foi feito um levantamento de todas as bocas de minas do estado por um grupo técnico no qual foi comprovado ter cerca de 809 bocas de minas, muitas destas gerando acidez e ainda com cerca de 51% destas abertas, somente no estado catarinense. Comprovando assim a dificuldade do monitoramento e fiscalização do órgão competente que é o Departamento Nacional de Produção Mineral, não sendo possível ter uma real ideia da situação que o país se encontra e ainda, por essa falta de fiscalização, não há incentivo para as empresas em investir em novas técnicas e tecnologias para o fechamento e mitigação dos impactos por elas gerados.

Gomes (2009) explica que a ausência de atividades tectono-magmáticas em tempos geológicos considerados relativamente recente, implica que o regime térmico da grande parte da crosta da plataforma Sul Americana seja considerado estacionário, e assim, condições desta natureza são favoráveis para a ocorrência de recursos geotermiais de baixa entalpia, sendo por este motivo que no Brasil o aproveitamento está mais voltado para fins recreativos apesar de existirem casos registrados de usos industriais, como foram citados anteriormente os casos de Taubaté e Cornélio Procópio.

3 CONCLUSÕES

Após o encerramento das atividades minerárias, as escavações subterrâneas podem ter vários destinos como o fechamento propriamente dito e recuperação da área, bem como ser destinado para um novo uso, como para turismo, estoques, museus etc. Este fim deve obedecer normas e fins de maneira a mitigar os impactos gerados pelo empreendimento durante a fase de operação.

É esperado o aumento de extração de bens pela modalidade de mina subterrânea, uma vez que os recursos extraídos pela técnica de mina a céu aberto estão cada vez mais profundos, acabando por viabilizar a mudança de modalidade de extração, bem como a abertura de novas minas antes não economicamente viáveis.

É importante o uso consciente de recursos e redução dos custos de operação na viabilização de empreendimentos minerários, uma vez que altos custos estão relacionados ao condicionamento da mina. Estes custos podem ser drasticamente reduzidos por um melhor controle e uso energético, seja ele por utilização de recursos energéticos menos onerosos e impactantes ou pelo uso de técnicas de ventilação mais eficientes energeticamente como a técnica de ventilação sob demanda - VOD.

Este trabalho mostra que é viável a utilização dos potenciais geotérmicos em uma mina subterrânea por meio da análise de projetos já em operação, levando em conta que a escavação, que é a parte mais onerosa da implementação do sistema, encontra-se realizada pela extração mineral. Porém também mostra a grande necessidade de investimentos em pesquisa para a melhor eficiência das técnicas e adaptação das mesmas para climas tropicais como é o caso do Brasil, tendo em vista que a grande parte dos trabalhos publicados sobre o assunto descrevem a utilização deste sistema em regiões de clima frio, tornando cada vez mais eficiente o processo.

Também foi possível perceber durante as pesquisas que países que já usam este tipo de técnica são os mesmos países líderes em produção de energias renováveis. O que leva a se crer que uma mudança ideológica deve ocorrer no Brasil, que por sua abundância em recursos acaba por ter um alto desperdício energético, por ainda não ter uma política de uso de energias renováveis forte e diversificada, sua matriz energética é baseada em fontes hídricas de energia que o torna muito dependente de condições climáticas para suprir suas demandas energéticas.

Por fim, este trabalho tem a ideia de abrir uma linha de pesquisa na área de aproveitamento e aprimoramento de técnicas existentes em conjunto com o uso consciente dos recursos minerais e energéticos. Sendo necessários trabalhos posteriores com foco nas aplicações destas tecnologias no Brasil, bem como o levantamento de dados das minas brasileiras e suas respectivas simulações de implementação, de maneira a demonstrar os pontos positivos e negativos associados aos custos e receitas gerados. Desta forma, auxiliando mostrar a mineração, que é vista como depredadora do meio ambiente, em uma indústria de produção consciente, com a redução de desperdícios de recursos e dos impactos socioambientais gerados, produzindo os recursos minerais essenciais para nossa sobrevivência de maneira sustentável e não depredatória.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBASY, F. **An Investigation into Application of Geothermal Energy in Underground Mines**. McGill University. Montreal, Quebec, Canada. 2013.
- ABBASY, F. et al. **An Investigation into Parameters contributing to heat transfer in mine backfill**. Chamber of Mining Engineers of Turkey. Istanbul. 2011.
- ALEXANDRINO, D. H.; COUY, C. E. M.; RODRIGUES, F. L. **Avaliação dos Recursos geotermicos de Minas Gerais**. [S.l.]. 2012.
- ASHRAE. **American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers**. [S.l.], p. 1-34. 2011.
- BARBIER, E. **Nature and Technology of Geothermal Energy: A Review**. [S.l.]. 1997. (doi: 10.1016/s1364-0321(97)00001-4).
- BARBIER, E. **Geothermal Energy Technology Current Status: An Overview**. [S.l.]. 2002. (Doi: 10.1016/ s1364- 0321(02) 00002-3).
- BARTSCH, E.; LAINE, M.; ANDERSEN, M. **The Application and Implementation of Optimized Mine Ventilation on Demand (OMVOD) at the Xstrata Nickel Rim South Mine, Sudbury, Ontario**. Simsmart Technologies. Sudbury, Ontario, Canadá. 2010.
- BEST GEOTERMIA, 2016. Disponível em: <<http://best-geotermia.com/index.php/seccion/geotermia-sistemas/>>. Acesso em: 20 dez. 2016.
- BOTTI, N. H. **Resfriamento e Aquecimento Geotermico**. NSB Climatização Ltda. [S.l.]. 2016.
- BRASIL- MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Nacional de Mineração 2030**. Brasília. 2010.
- CHIASSON, A. D. **Advances in Modeling of Ground- Source Heat Pump Systems**. Oklahoma State university. Stillwater, Oklahoma, USA, p. 155. 1999.
- CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL (COPAM). **Diretrizes e Procedimentos para Avaliação Ambiental da Fase de Fechamento de Mina**. [S.l.]. 2008.
- DEMOLLIN-SCHNEIDERS, E.; MALOLEPSZY, Z.; BOWERS, D. **Potential use of Geothermal Energy From Mine Water in Europe for Cooling and Heating**. Santorini, Grecia, p. 683-685. 2005.
- DICKSON, M. H.; FANELLI, M. **Cos'è l'Energia Geotermica?** Istituto di Geoscienze e Georisorse. Pisa, Italia. 2004.
- FERRARI, A. T. **Metodologia da Pesquisa Científica**. McGraw-Hill do Brasil. São Paulo. 1982.
- GEOGRAFIA LEGAL, 2016. Disponível em: <<http://www.geografialegal.com.br/author/anderson/>>. Acesso em: 20 dez. 2016.
- GHOREISHI- MADISEH, S. A. et al. **Sustainable Heat Extraction from Abandoned Mine tunnels: A Numerical Model**. [S.l.]. 2012. (Doi:10.1063/1.4712055).
- GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6ª edição. ed. São Paulo: Editora Atlas S.A., 2008.
- GOMES, A. J. L. **Avaliação de Recursos Geotermiais da Bacia do Paraná**. Observatorio Nacional. Rio de Janeiro. 2009.

- HALL, A.; SCOTT, J. A.; SHANG, H. **Geothermal Energy Recovery from Underground Mines**. Renewable and Sustainable Energy. Ontario, p. 916-924. 2011.
- HAMZA, V. M.; CARDOSO, R. R.; GOMES, A. J. L. **Geothermal Resource Base for South America: A Continental Perspective**. Bali, Indonesia, p. 25-29. 2010.
- HAMZA, V. M.; CARDOSO, R. R.; NETO, C. F. P. **Spherical Harmonic Analysis of Earth's Conductive Heat Flow**. [S.l.]. 2008.
- HAMZA, V. M.; GOMES, A. J. L.; FERREIRA, L. E. T. **Status Report on Geothermal Energy Developments in Brazil**. Antalya, Turquia. 2005.
- HARRISON, R.; MORTIMER, N. D.; SMARASON, O. B. **Geothermal Heating: A Hand Book of Engineering Economics.1 St Edition**. Oxford , p. 556. 1990.
- HERNANDEZ NETO, A.; VOLTANI, E. R. **Sistemas de Resfriamento e Aquecimento Geotermico**. [S.l.], p. 78-87. 2013.
- HERZOG, A. V.; LIPMAN, T. E.; KAMMEN, D. M. **Renewable Energy Sources**. University of California. [S.l.]. 2004.
- JESSOP, A. M.; MACDONALD, J. K.; SPENCE, H. **Clean Energy from Abandoned Mines at Springhill**. Nova Scotia, p. 93-108. 1995. (DOI:10.1080/00908319508946072).
- JIM, H. **Parameter Estimation Based Models of Water-Source Heat Pump**. Oklahoma State University. Stillwater, Oklahoma, USA, p. 383. 2002.
- KHAN, M. H. **Modeling, Simulation and Optimization of Ground Source Heat Pump Systems**. Oklahoma State University. Stillwater, Oklahoma, USA, p. 218. 2004.
- LOBO, J. W. et al. **Determinação da Eficiência e da Aplicabilidade de Bombas de Calor em Clima Temperado Subtropical Típico da Região Sul do País Primeira Fase**. Parana. 2004.
- LUND, J. W. **Geothermal Direct use**. [S.l.], p. 859-873. 2004.
- LUND, J. W. **Characteristics, Development and Utilization of Geothermal Resources**. [S.l.]. 2007.
- MENEZES, R. K. D. **Energia Geotérmica: Aproveitamento**. Universidade Federal do Ceará. [S.l.]. 2012.
- MICHEL, F. A. **Utilization of Abandoned Mine Workings for Thermal Energy Storage in Canada**. Carleton University. Ottawa, Canada. 2009.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Resenha Energética Brasileira**. Ministério de Minas e Energia. Brasília DF, p. 31. 2016.
- MIRANDA, J. F. **Uso Sustentável da Área Minerada da Mina da Passagem**. Universidade Federal de Ouro Preto. Lisboa, p. 29. 2010.
- O FRIO QUE VEM DO SOL, 2016. Disponível em: <<http://ofrioquevemosol.blogspot.com.br/2011/08/luto-na-comunidade-cientifica-de.html>>. Acesso em: 20 dez. 2016.
- OLIVEIRA JUNIOR, J. B. **Desativação de Mina - Conceitos, planejamentos e custos**. Salvador. 2006.
- OLIVEIRA, D. E. G. **Estudo da ventilação da Mina Taquari-Vassouras com ênfase no projeto de expansão**. Fundação Gorceix. Ouro Preto. 2013.

- ONU- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. ONU e Meio Ambiente. <https://nacoesunidas.org>, 1987 1987. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/acao/meio-ambiente/>>. Acesso em: 22 Dezembro 2016.
- OSGENER, L.; HEPBASLI, A.; DINCER, I. **Parametric Study of the Effect of Dead State on Energy and Exergy Efficiencies of Geothermal District Heating Systems**. Heat Transfer Engineering. Turquia. 2007.
- OSTRIDGE, R. **An Introduction to Geothermal Energy**. Charlottetown. 1998.
- RABELO, J. L. et al. **Aproveitamento da Energia Geotermica do Sistema Aquifero Guarani: Estudo de Caso**. XII Congresso Brasileiro de Aguas Subterrâneas. Florianopolis. 2002.
- RAFFERTY, K. **A Capital cost Comparison of Commercial Ground Source Heat Pump Systems**. [S.l.]. 1995.
- RAFFERTY, K. **Design Aspects of Commercial Open-loop Heat Pump Systems**. [S.l.]. 2001.
- REVISTA FERNÃO DIAS, 2016. Disponível em: <<http://revistafernaodias.com.br/mina-da-passage-e-uma-das-maiores-do-mundo-abertas-a-visitacao/>>. Acesso em: 25 jan. 2016.
- RIBEIRO, J. C. J.; MENDES, S. F. **A Participação no Fechamento de Mina no Direito Comparado**. Belo Horizonte, p. 23-54. 2013.
- RIO TINTO. **Encerramento da Mina Cabaçal Mineração Manati**. Mato Grosso, p. 17. 2008.
- RODRIGUES, R.; DÍAZ, M. B. **Analysis of the Utilization of Mine Galleries as Geothermal Heat Exchangers by Means a Semi-Empirical Prediction Method**. [S.l.], p. Renewable Energy 34 1716-1725. 2009.
- RODRIGUEZ, R.; AGUADO, M. B. D. **Estimating Limits for the Geothermal Energy Potential of Abandoned Underground Coal Mines: A Simple Methodology**. University of Oviedo. Oviedo, Spain. 2014. (doi: 10.3390/en7074241).
- SANNER, B. **Shallow Geothermal Energy**. [S.l.]. 2001.
- SILVA, J. M. **Aspectos Ambientais e Fechamento de Minas Subterrâneas**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 12. 2016.
- SOUZA FILHO, M. N. **Avaliação do Potencial Geotermico da Bacia Sedimentar de taubaté**. Universidade de Coimbra. Coimbra. 2012.
- SOUZA, L. M. C. G. **Potencialidade de Aproveitamento das Minas Abandonadas para a Geração de Energia Geotermica no Brasil Sobre o Prisma Gerencial de Sustentabilidade**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianopolis , p. 174-188. 2014.
- SPITLER, J. et al. **Preliminary Intermodal Comparison of Ground Heat Exchanger Simulation Models**. Proceedins of 11 th International Conference on Thermal Energy Storage. Effstock, Stockholm, Sweden, p. 8. 2009.
- SPITLER, J. et al. **Residential Ground Source Heat Pump System Utilizing Foundation Heat Exchangers**. Proceedings of Clima. Antalya, Turkey, p. 8. 2010.
- STEFÁNSSON, V. **Investment Cost for geothermal Power Plants**. [S.l.]. 2002. (doi: 10.1016/s0375-6505(01)00018-9).
- WATZLAF, G. R.; ACKMAN, T. E. **Underground mine water for heating and cooling using geothermal heat pump systems**. [S.l.]. 2006.

WILEY, S. C. Optimization of the Quantity of Heated/Refrigerated Air Required for Ventilating Underground Mines With Ventilation-on-Request Systems. UNiversity of Montana. Montana, p. 108. 2015.

WRIGHT, M. Nature of Geothermal Resources. Geothermal Direct- use Engineering and Design Guidebook. Klamath Falls, Oregon, p. 27-69. 1998.