



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ**

PABLO AUGUSTO REIS BATISTA

**APROVEITAMENTO DO POTENCIAL GEOTÉRMICO: REVISÃO
BIBLIOGRÁFICA**

**ARAXÁ/MG
2018**

PABLO AUGUSTO REIS BATISTA

**APROVEITAMENTO DO POTENCIAL GEOTÉRMICO: REVISÃO
BIBLIOGRÁFICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Me. Guilherme Alzamora Mendonça

ARAXÁ/MG

2018

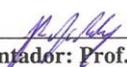
FOLHA DE APROVAÇÃO

PABLO AUGUSTO REIS BATISTA

**APROVEITAMENTO DO POTENCIAL GEOTÉRMICO: REVISÃO
BIBLIOGRÁFICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Araxá, 05 de julho de 2018.



Presidente e Orientador: Prof. Me. Guilherme Alzamora Mendonça
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade
Araxá



Membro Titular: Prof. Dr. Alexander Martin Silveira Gimenez
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade
Araxá



Membro Titular: Prof. Me. Felipe Valença de Oliveira
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade
Araxá

DEDICATÓRIA

DEDICO ESTE TRABALHO

Aos meus pais e toda minha família que não mediram esforços para que este sonho pudesse tornar-se realidade.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por nunca me abandonar, mesmo nos momentos de fraqueza e desânimo, sempre me mostrar o caminho de luz e por colocar em minha vida pessoas tão queridas e singulares.

Aos meus pais que sempre batalharam para que seus filhos pudessem estudar, mesmo sabendo que essa luta seria árdua e complicada. Vocês são exemplos de simplicidade, perseverança e amor. Sempre serão pessoas em quem me apoiarei, sem as quais não imagino viver.

Ao meu orientador Guilherme Alzamora por me auxiliar com toda sua experiência e competência.

Aos meus amigos, que fizeram esses momentos de estudos, apesar de difíceis, serem de grande aprendizagem. Obrigado por fazerem parte desta conquista e, com certeza, contribuíram bastante para esta vitória.

Não poderia esquecer da minha vizinha Márcia, que nos momentos de dificuldades sempre estava ao meu lado para me dar suporte e me aconselhar.

EPÍGRAFE

Com a sabedoria constrói-se a casa, e com a prudência ela se consolida. Com a experiência enchem-se as despensas com toda a sorte de bens preciosos e agradáveis.

Provérbios 24,3

RESUMO

A decrescente utilização dos combustíveis fósseis em contraste ao crescente usufruto de fontes alternativas de energia corrobora esta preocupação mundial com os efeitos negativos quando os combustíveis fósseis são empregados. Tendo em vista esse fato, os recursos geotérmicos surgem como uma opção para substituir fontes de energias não renováveis. No entanto, o emprego da energia geotérmica é ínfimo, uma vez que existem muito empecilhos que dificultam a utilização dela. Dado esse cenário, esta monografia tem como principal intuito minimizar a carência de conhecimento em relação à utilização da energia geotérmica, bem como despertar a discussão acerca deste tema. Para tanto, foi pesquisado em diversas fontes distintas trabalhos publicados sobre o emprego desta fonte energética, bem como a situação mais recente da mesma, a fim de trazer à tona esta realidade em relação à energia geotérmica.

Palavras-chave: Energia geotérmica. Fontes alternativas. Recursos geotérmicos.

ABSTRACT

The decreasing use of fossil fuels in contrast to the increasing use of alternative energy sources corroborates this worldwide concern with the negative effects when fossil fuels is employed. In view of this fact, geothermal resources appear as an option to replace non-renewable energy sources. However, the use of geothermal energy is negligible, since there are many obstacles that make it difficult to use it. Given this context, this monograph has the main purpose of minimizing the lack of knowledge regarding the use of geothermal energy, as well as awakening the discussion about this topic. For this purpose, it was investigated in several different sources published works on the use of this energy source, as well as the most recent situation of the same to offer the readers in relation to the geothermal energy.

Keywords: Geothermal energy. Alternative sources. Geothermal resources.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1- Oferta interna de Energia no Brasil em 2016.....	17
FIGURA 2 - Esquema da dinâmica interna da Terra.	19
FIGURA 3 - Geoterma que descreve como a temperatura varia com a profundidade.....	22
FIGURA 4 - Potencial geotérmico da Terra.....	24
FIGURA 5 - Mapa do fluxo de calor do Brasil.	25
FIGURA 6 - Distribuição regional de gradientes geotérmicos com base em conjuntos de dados selecionados (métodos CVL, CBT e AQT).	25
FIGURA 7 - Mapa da base de recursos geotérmicos de Goiás. Os valores de contorno são em unidades de 10^{12} J/m ²	26
FIGURA 8 - Mapa preliminar do fluxo de calor da Bacia do Paraná. Os contornos estão em unidades de mW/ m ²	27
FIGURA 9 - Distribuição geotérmica do estado de Minas Gerais.	28
FIGURA 10 - Esquema do aproveitamento geotérmico pelo sistema convectivo hidrotermal.	29
FIGURA 11 - Aproveitamento energético de um sistema ígneo quente.	30
FIGURA 12 - Áreas de alta e baixa temperatura no mundo.	30
FIGURA 13 - Paralelo da energia mundial em TJ / ano para 1995, 2000, 2005 e 2010.....	32
FIGURA 14 - Utilidades da energia geotérmica em todo o mundo no ano de 2010 em porcentagem do consumo total de energia.	32
FIGURA 15 - Fator de capacidade de algumas fontes energéticas.	33
FIGURA 16 - Representação do "closed loop system".	34
FIGURA 17 - Representação do sistema "open loop".	35
FIGURA 18 - Representação de trocador de calor para sistema GFHE.	36
FIGURA 19 - Esquema do (A) Closed loop vertical system (B) Closed loop horizontal system e (C) closed horizontal-slinky system.	37
FIGURA 20 - Esquema de trocador de calor para sistema GWHE.....	37
FIGURA 21 - <i>Open loop system</i> de águas subterrâneas.....	38
FIGURA 22 - Representação de trocador de calor para sistema SWHE.....	39
FIGURA 23 - Esquema de trocador de calor para sistema GAHE.	39
FIGURA 24 - Custos de fontes alternativas de energia.....	41
FIGURA 25 - Custos da utilização da energia geotérmica.	42

FIGURA 26 - Comparação entre as fontes energéticas em relação à conversão de gás sulfídrico em dióxido de enxofre.....	45
FIGURA 27 - Comparação de caldeira de carvão pulverizado, ciclo combinado de gás natural e energia geotérmica em relação às partículas emitidas.....	45
FIGURA 28 - Subsidência causada por uma perfuração geotérmica.....	47

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Tempo de meia-vida e proporção dos isótopos produtores de calor no passado em relação ao presente.....	20
TABELA 2 - Níveis de emissão por poluente e fonte de energia.	46

LISTA DE SÍMBOLOS

Km	Quilômetro
°C	Graus Celsius
Kg	Quilograma
MW	Mega Watts
h	Hora
TJ	Tera Joule
m ²	Metro ao quadrado
\$	Dólar

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	METODOLOGIA.....	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	Recursos Naturais	17
3.2	Descrição da estrutura da Terra segundo aspectos químicos e reológicos	18
3.3	Fluxo de Calor da Terra	20
3.4	Gradiente Geotérmico.....	21
3.5	Fluxo Geotérmico	22
3.6	Classificação dos recursos geotérmicos.....	28
3.7	Utilização da Energia Geotérmica	31
3.8	Sistemas de Energia Geotérmica	34
3.8.1	Closed Loop System.....	34
3.8.2	Open Loop System	35
3.8.3	GFHE (Ground to Fluid Heat Exchangers / trocador de calor subterrâneo para água com uso de bomba de calor).....	35
3.8.4	GWHE (Groundwater heat exchangers / trocador de calor de águas subterrâneas)..	37
3.8.5	SWHE (Surface Water Heat Exchangers / trocador de calor de águas superficiais).	38
3.8.6	GAHE (Ground to Air Heat Exchanger / trocador de calor subterrâneo para ar)	39
3.9	Custos e Riscos da Energia Geotérmica.	40
3.10	Impactos da Utilização da Energia Geotérmica.....	43
3.10.1	Impactos na pobreza e distribuição de renda.....	43
3.10.2	Efeitos na saúde, educação, atmosfera e meio ambiente	43
3.10.3	Subsídência.....	46
3.10.4	Sismicidade	47
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	48
5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

1 INTRODUÇÃO

De modo geral, a mineração apresenta um alto consumo de energia elétrica, decorrente de diferentes etapas do processo produtivo, sendo o combustível fóssil a principal matéria prima para a geração dela. Entretanto, existe uma tendência mundial da substituição da utilização de combustíveis fósseis, visto que é uma fonte de energia não-renovável, além de ser bastante onerosa. Potencialmente, essa fonte energética contribui para o efeito estufa, uma vez que gases são liberados após a queima dos combustíveis fósseis, além de emitir particulados que poluem a atmosfera.

A partir da Revolução Industrial, a utilização de combustíveis fósseis como fonte de energia se intensificou, sendo muito aplicada até os dias atuais. Com o advento dessa tecnologia, as questões ambientais ganharam grande repercussão, visto que as consequências do emprego dessa fonte energética podem ser significativas. Alterações climáticas e a emissão de gases poluentes que contribuem para o efeito estufa são alguns dos problemas que devem ser minimizados, causando relevantes discussões mundiais.

Para tanto, existe uma busca por fontes energéticas alternativas e renováveis, que causem menos impactos negativos ao meio ambiente. Dessa forma, espera-se proporcionar às gerações futuras a possibilidade de usufruir desses recursos naturais. Como exemplo de energias renováveis, cita-se energia solar, eólica, geotérmica, hídrica, dos mares, biomassa e termoelétricas.

Em relação à matriz energética mundial, de acordo com a Resenha Energética Brasileira - Ministério de Minas e Energia (2016), nota-se que o Brasil possui uma diferença discrepante na utilização da energia hidráulica, com 68,1% em 2016. No Brasil, assim como no mundo, houve uma diminuição considerável da utilização de petróleo e seus derivados, como fonte de energia, nos anos de 1973 e 2016, o que corrobora a preocupação deles com os problemas decorrentes desse recurso energético. Evidentemente, questões geopolíticas e de mercado também influenciam sobre a mudança de fontes energéticas. Em contrapartida, a utilização de carvão mineral aumentou ligeiramente no Brasil e no Mundo, com valores de 2,7% e 39,1%, respectivamente. Embora tenha ocorrido certa evolução, a mesma não foi tão expressiva, o que confirma, novamente, essa preocupação ambiental.

Já a energia geotérmica não é utilizada de forma significativa no Brasil, em contraste com outros países, que produzem energia elétrica a partir da contribuição desse tipo de fonte energética. Ainda assim, a energia geotérmica é pouco empregada mundialmente, sendo utilizada apenas 0,3% em relação a outras fontes, segundo a Resenha Energética Brasileira -

Ministério de Minas e Energia (2016). Entretanto, essa realidade pode ser alterada, visto que esse tipo de energia renovável possui muitas características positivas.

Segundo Boyd e Lund (2016) uma estimativa da capacidade de geração para utilização direta no final de 2014 indica valores da ordem de 70.329 MWt, um aumento de 45% em relação aos dados de 2010. Já a energia utilizada é de 587.786 TJ/ano, que é aproximadamente 38,7% maior em relação a 2010. Comparando os valores de 2015 com 1995, houve um aumento significativo, em torno de 712%, na capacidade de energia térmica gerada, assim como a energia utilizada evoluiu cerca de 423% nesse mesmo período. Portanto, nota-se que a energia geotérmica tem ganhado importância nesses últimos anos, visto que possui vários pontos positivos em relação a outras fontes de energia existentes.

De acordo com POPP *et al* (2014) essa fonte de energia é reconhecida como uma das alternativas mais promissoras e limpas para geração de calor e eletricidade. Essa fonte energética possui vantagens importantes, tais como a de ser independente de fatores climáticos, apresentar baixa emissão de gases tóxicos, que contribuem para o efeito estufa, em relação às demais, além de baixo custo de geração de energia em comparação com outros métodos.

Devido ao gradiente térmico da Terra, diferentes potenciais de utilização desse tipo de energia podem ser aproveitados, dependendo da temperatura do recurso geotérmico. Dessa forma, tem-se recurso de baixa, moderada e alta entalpia, sendo que isso ocorre em decorrência do decaimento dos elementos radioativos presente no interior do planeta. Então, energia geotérmica é aquela proveniente do calor interno da Terra, sendo um campo importante das energias renováveis.

A extração de bens minerais a partir de métodos subterrâneos tem se tornado uma atividade muito importante no contexto atual da mineração. No entanto, a mineração subterrânea, bem como a mineração a céu aberto, apresenta um alto consumo de energia elétrica e, por sua vez, os gastos com a mesma são elevados. Em vista disso, a utilização do potencial geotérmico de uma mina subterrânea pode ser uma alternativa para amenizar o consumo de eletricidade, por exemplo, no sistema de ventilação no subsolo, iluminação, entre outros.

Visando reduzir os custos com o uso da energia elétrica e reforçar a busca por energias menos agressivas ao meio ambiente, o aproveitamento do potencial geotérmico é uma forma de produção de eletricidade, dita como renovável.

O objetivo desta resenha científica é fazer uma compilação bibliográfica acerca do aproveitamento e utilização da energia geotérmica, retratando os aspectos envolvendo o

aproveitamento da energia geotérmica no contexto atual da engenharia e fomentar discussão sobre a possibilidade de sua aplicação no suprimento da energia elétrica. Apresentar o conceito que envolve as energias renováveis e o motivo pelo qual têm ganhado maior repercussão, assim como enfatizar as principais aplicações da energia geotérmica.

2 METODOLOGIA

Esta revisão denota um levantamento crítico da literatura acerca da utilização da energia geotérmica, sendo apresentada com um comportamento de pesquisa bibliográfica. Para tanto, foi empregado como base artigos científicos e outros estudos presentes nas bibliografias, com o intuito de tornar esse trabalho mais verídico e confiável.

Primeiramente foi realizada uma análise de literatura sobre o aproveitamento geotérmico. Para a coleta das bibliografias, foi utilizado várias plataformas de pesquisas, são elas a Periódicos CAPES, o ScienceDirect e o Engineering VillageTM, uma vez que possuem informações de engenharia sobre o assunto abordado nesse trabalho. Os termos de busca utilizados, com o propósito de idealizar esta pesquisa, foram “geothermal energy”, “geothermal heat pumps”, “Renewable and sustainable energy reviews” – utilizados no Periódicos CAPES, no ScienceDirect e no Engineering VillageTM, entre os meses de dezembro de 2017 e abril de 2018, com o objetivo de levantar a literatura necessária para embasar esta revisão bibliográfica. Em seguida, foi feita uma leitura minuciosa e crítica de toda a literatura escolhida, destacando as partes mais relevantes e estas foram sintetizadas e parafraseadas. A partir de então, foram definidos os assuntos a serem tratados, a organização e a coerência entre as ideias, além da melhor maneira de exposição dos dados adquiridos.

Durante a concepção do trabalho, foi desenvolvido ideias acerca da utilização de fontes renováveis, em especial a geotérmica e, a partir disso, foram expressas observações críticas mediante a revisão bibliográfica realizada para embasar o estudo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Recursos Naturais

De acordo com o senso comum e enfatizado por Taioli (2009), são classificados como recursos naturais aqueles que estão disponíveis na natureza para a utilização humana e que são explorados de forma direta e indireta. Assim, o homem satisfaz as próprias necessidades, visando à perpetuação da espécie e conforto.

Ainda de acordo com Taioli (2009), os recursos energéticos podem ser classificados em renováveis e não renováveis. As fontes de energias não renováveis são aquelas que estão disponíveis em quantidades finitas na Terra e se esgotam à medida que a exploração vai ocorrendo. Em contrapartida, as fontes são ditas renováveis quando não se estabelece um fim temporal para elas.

A Figura 1 representa alguns exemplos de fontes de energias renováveis e não renováveis e a participação de cada uma no cenário energético brasileiro. Conforme Ministério de Minas e Energia – Resenha Energética (2016), o Brasil fez mais uso de energias não renováveis para o suprimento energético, com 56,5%. Com isso, nota-se certa dependência do país em relação aos combustíveis fósseis, e que deve ser amenizado pensando que isso pode trazer benefícios ao meio ambiente e a sociedade como um todo.

Em relação às energias renováveis, o Brasil utiliza, em sua maioria, o etanol e o bagaço, com 40,1%, seguido da energia hidráulica, com valor de 28,9%. A energia geotérmica, tema central desse trabalho, constitui, além de outras fontes energéticas, a categoria outros, com 7,8% de uso, do qual tem-se pouco estudo e conhecimento. É conclusivo que o Brasil tem muito potencial no quesito energia renovável, porém não é habilmente aproveitada.

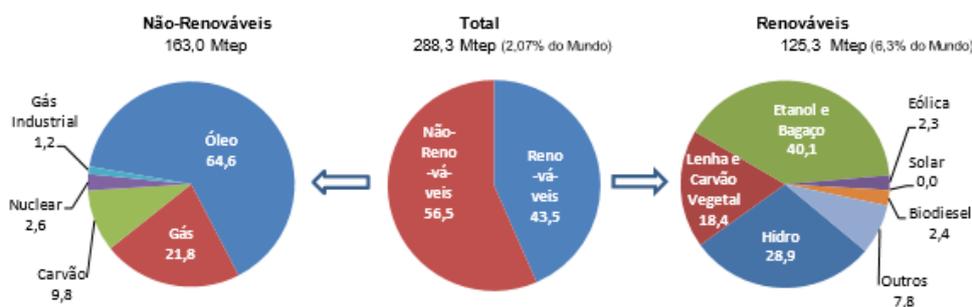


Figura 1- Oferta interna de Energia no Brasil em 2016.

Fonte: Ministério de Minas e Energia – Resenha Energética (2016).

3.2 Descrição da estrutura da Terra segundo aspectos químicos e reológicos

“Entre as formas de energias renováveis se encontra a energia geotérmica, originada do calor que provém da dinâmica interna da Terra, a qual é vista como uma alternativa para os problemas energéticos mundiais e do meio ambiente” (ARBOIT, 2013).

Segundo Wicander e Monroe (2009), a Terra é constituída por três zonas distintas: um núcleo central, um manto e a crosta terrestre. O Núcleo da Terra possui densidade entre 10 e 13 g/cm³ e é constituído, em sua maioria, do elemento ferro, além de outros elementos pesados, tal como o níquel. Isso é possível porque na terra primitiva estes elementos, em especial o ferro, eram mais abundantes. Dados sísmicos revelam que o núcleo seja formado por uma parte externa líquida e uma parte interna pequena e sólida, a qual está sujeita a uma alta pressão.

Ainda segundo os autores anteriores, o manto se encontra entre o núcleo e a crosta terrestre e possui densidade intermediária, entre 3,5 e 3,7 g/cm³. Consiste em uma rocha com composição semelhante à do peridotito, constituída principalmente de magnésio, ferro e silício. Acredita-se que o manto seja diferenciado em três zonas diferentes. O manto inferior sólido, que ocupa maior volume da Terra, é circundado pela astenosfera. Ambos possuem a mesma composição química, porém esta última apresenta comportamento plástico e pode fluir. O manto superior integra parte da astenosfera e rocha mantélica consolidada.

Segundo Press *et al* (2006), a crosta é a parte mais externa e menos espessa da Terra, com cerca de 40 km de espessura. Contém materiais mais leves e com baixas temperaturas de fusão, tais como silício, alumínio, sódio, potássio, magnésio e cálcio combinados com o oxigênio.

A Figura 2 retrata a composição interna da Terra, bem como a espessura de cada zona que compõe a dinâmica interna desse planeta. Assim, reproduz, de forma digna, o que já foi dito sobre o assunto.

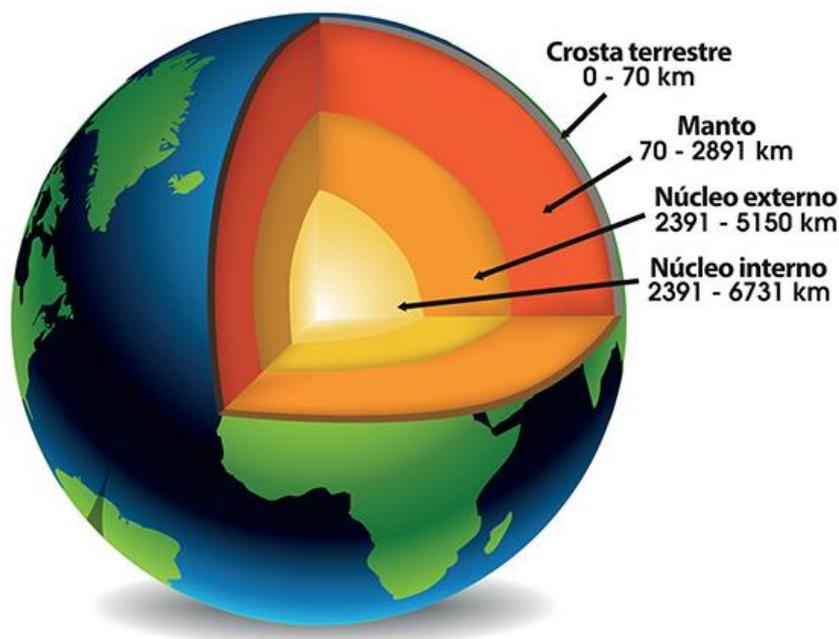


Figura 2 - Esquema da dinâmica interna da Terra.

Fonte: Universia ENEM.

A fonte de calor do interior da Terra pode ser original, da formação da Terra, e o calor gerado pelo decaimento natural dos elementos radioativos presentes em sua composição. Segundo Marques (2006), o aumento de pressão no interior da Terra proporcionado pelo processo de acreção em sua origem, causou também elevação da temperatura em seu interior profundo. Estima-se que esse processo foi responsável pelo aumento da ordem de 1000°C a 1200°C.

Além disso, a radioatividade presente em alguns elementos gera uma quantidade de calor significativa, que contribuiu de forma expressiva e continua gerando calor no interior do planeta intensamente.

Embora todos os elementos radioativos produzam calor, os principais isótopos radioativos responsáveis pela produção atual de calor na Terra são U^{238} , U^{235} , Th^{232} e K^{40} . Esses radioisótopos apresentam meias-vidas da ordem de bilhões de anos, ou seja, após um intervalo de tempo dessa magnitude, a abundância de cada um deles diminui à metade do valor inicial. Dessa forma, considerando que a Terra possui 4,5 bilhões de anos, as concentrações desses radioisótopos são ainda hoje suficientemente elevadas para gerar constantemente calor (MARQUES, 2006, p.24).

Devido a esses processos descritos, estima-se que a temperatura no interior da Terra atingiu valores entre 1000 e 1800°C, sob profundidades entre 500 e 700 km. Em decorrência disso, o ferro metálico presente na Terra fundiu e deslocou para o centro

do planeta, provocando aumento de temperatura em torno de 1500 a 2000°C (MARQUES, 2006, p.24).

A partir do que foi exposto, é possível dizer que o decaimento radioativo é o principal renovador dessa energia interna da Terra e, devido ao seu longo tempo de meia-vida, pode gerar ainda grandes quantidades de calor. Conforme Moraes (2016), as séries U^{235} , Th^{232} , K^{40} e U^{238} são responsáveis por 98% do calor radiogênico gerado.

A tabela 1 mostra o decaimento isotópico dos elementos que compõe a Terra e a geração de energia deles. Nota-se que, para o ^{40}K , a relação da quantidade desse elemento para $4,5 \times 10^9$ anos atrás é de 1:10,9. Com relação à geração de calor, o elemento urânio (U^{235}) contribui com 56 mW/kg, ao passo que o tório (Th^{232}) gera calor na ordem de 2,6 mW/kg.

Tabela 1 - Tempo de meia-vida e proporção dos isótopos produtores de calor no passado em relação ao presente.

	Meia vida x 10^9 anos	Geração de calor (mW/kg)	Hoje	10^9 anos atrás	2×10^9 anos atrás	3×10^9 anos atrás	$4,5 \times 10^9$ anos atrás
^{40}K	1,30	2,80	1,00	1,70	2,89	4,91	10,90
^{232}Th	14,01	2,60	1,00	1,05	1,11	1,16	1,25
^{235}U	0,704	56,00	1,00	2,64	6,99	18,50	80,00
^{238}U	4,97	9,60	1,00	1,17	1,36	80,00	2,00

Fonte: Adaptada Decifrando a Terra (2000), p.484.

3.3 Fluxo de Calor da Terra

A dissipação de calor ocorre de diferentes maneiras na crosta terrestre devido à heterogeneidade da crosta. A dispersão de calor acontece em decorrência de três tipos distintos de transferência de calor, sendo elas a radiação, convecção ou condução.

A radiação solar é responsável pelos processos que acontecem na superfície da Terra e na atmosfera. Porém, com o aumento da profundidade, essa energia é desprezível e, o aumento da temperatura que ocorre, é devido ao fluxo de calor do interior da Terra. O fluxo geotérmico através da camada da Terra é definido pelo produto do gradiente geotérmico (variação da temperatura com a profundidade) pela condutividade térmica da rocha (TEIXEIRA *et al*, 2009, p.502).

Segundo Teixeira *et al* (2009), o conhecimento das variações de temperatura com a profundidade é precário, visto que são conhecidas temperaturas somente na superfície da Terra, por furos de sondagem ou no interior das minas. A condutividade térmica também é medida com rochas próximas a superfície e os valores para maiores profundidades são conhecidas por meio da sismologia, principalmente.

O transporte de calor no interior da Terra pode ocorrer por meio da convecção, que ocorre na maior parte do planeta, ou condução, que domina na litosfera. A condução ocorre quando as moléculas são agitadas e empurradas umas contra as outras, transferindo mecanicamente vibração da região mais quente para a mais fria. Por esse processo, o calor é transferido de uma região de alta temperatura para uma região de baixa temperatura (PRESS *et al*, 2006, p.536).

O movimento convectivo do núcleo externo líquido transfere calor para dentro do manto muito rapidamente. A existência de convecção do manto, apesar de ser sólido, é explicado pela tectônica de placas e pelo soerguimento do assoalho oceânico. O soerguimento da matéria quente resulta em uma nova litosfera, que é resfriada à medida que vai distanciando. Após um tempo, é subductada para dentro do manto, onde é reaquecida. Esse processo cíclico é uma forma de convecção (PRESS *et al*, 2006, p.536).

3.4 Gradiente Geotérmico

A variação da temperatura com a profundidade é denominada de gradiente geotérmico, e é descrita por uma curva denominada de Geoterma. A Figura 3 mostra essa curva estimada, a qual é determinada de acordo com a forma que a temperatura aumenta com aumento da profundidade.

Sempre que houver um gradiente térmico entre dois pontos, ocorre um processo dinâmico que visa estabelecer o equilíbrio, diminuindo o gradiente.

Dessa forma, ocorre transferência de calor da área mais quente para a mais fria, chamada de fluxo térmico. Esta, por sua vez, depende de uma característica intrínseca do material, a condutividade térmica (TEIXEIRA *et al* 2009, p.502).

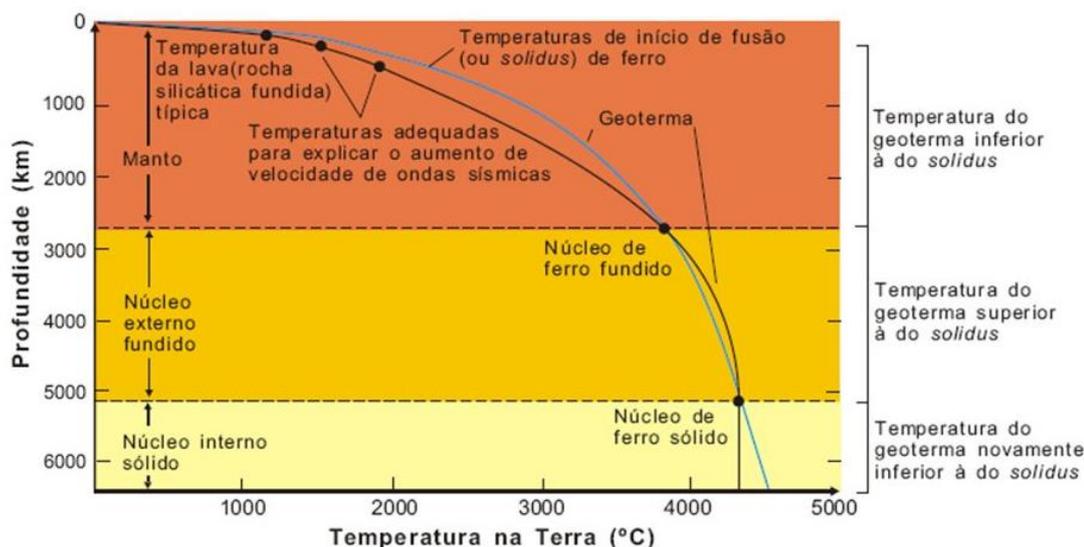


Figura 3 - Geoterma que descreve como a temperatura varia com a profundidade.

Fonte: Teixeira *et al* (2000, p.502).

A partir de dados de furos de sondagem na crosta terrestre, chegou-se a um consenso de que o gradiente térmico nessa região é 30-40°C por quilômetro (TEIXEIRA *et al*, 2000). No entanto, dependendo das condições tectônicas nas quais tal região foi submetida, este parâmetro pode alterar. Por isso, esse consenso as vezes não é aplicável, mas nos dá uma margem boa acerca do gradiente geotérmico.

De acordo com Press *et al* (2006), as temperaturas nas proximidades da litosfera variam de 1300 a 1400°C, as quais são muito próximas do ponto de fusão das rochas do manto. Além disso, dados laboratoriais mostram que a temperatura do núcleo externo líquido é superior a 3000°C. Já o núcleo interno é sólido e possui uma temperatura de ligeiramente menor que 5000°C.

3.5 Fluxo Geotérmico

Para aproveitar a energia geotérmica de forma satisfatória, dependendo da finalidade desta utilização, classifica-se os recursos geotérmicos disponíveis de acordo com as propriedades físicas do mesmo, tal como a temperatura e o estado físico do fluido presente naquele recurso. Segundo Souza Filho (2012), os recursos geotermiais podem ser classificados como sendo de baixa, média e alta entalpia, conforme o fluido existente no reservatório em questão e a temperatura do mesmo.

Os sistemas de alta entalpia ($>150^{\circ}\text{C}$) incluem predominantemente recursos de vapores e eventualmente líquidos, ao passo que os recursos de moderada entalpia (90 a 150°C) são quase unicamente líquidos. Em contrapartida, os sistemas de baixa entalpia ($< 90^{\circ}\text{C}$) dominados por recursos líquidos (WILLIAMS *et al*, 2008).

As regiões de alta entalpia, as quais possuem maior densidade de fluxo geotérmico conforme a figura 6 mostra, predominam nas zonas de vulcanismo, bordas de placas tectônicas ou em locais que, por alguma dissemelhança na crosta, gerou certo potencial geotérmico. Elas, por sua vez, possuem grande potencialidade na geração de energia por metro quadrado, de acordo com a Figura 4. No entanto, dependendo da finalidade do projeto que se deseja instalar, zonas de média ou baixa entalpia podem ser interessantes do ponto de vista econômico (BENFENATTI, 2017).

Sabe-se que o Brasil não possui atividade tectônica intensa e, em decorrência disso, fica restrito a recursos geotérmicos de baixa/média entalpia. É possível observar também que o Brasil possui baixa densidade de fluxo geotérmico em virtude da estabilidade tectônica que a mesma apresenta, uma vez que se encontra no centro da Placa Sul-Americana. Sendo assim, este país possui regiões de baixa e/ou média temperatura, o que limita a utilização desse recurso natural (MENEZES, 2012).

Recursos geotérmicos de baixa entalpia são mais numerosos no mundo que recursos de alta entalpia, porém são limitados a aplicações diretas dessa fonte energética (OUALI *et al*, 2012).

A Figura 5 representa as regiões do Brasil e seus respectivos valores de fluxo de calor. Dessa forma, conhecendo o fluxo geotérmico e as características geológicas do local, pode se aplicar sistema de aproveitamento específico (TEIXEIRA *et al*, 2000, p.485).

No Brasil, segundo Gomes e Hamza (2005), o Rio de Janeiro é um local muito promissor no que diz respeito à energia geotérmica. A Figura 6 revela que os gradientes de temperatura são considerados baixos e/ou normal (na faixa de 10 a $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$), principalmente na parte oriental do estado do Rio de Janeiro. Em contrapartida, gradiente com valores maiores que $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$, são encontrados nas partes ocidentais.

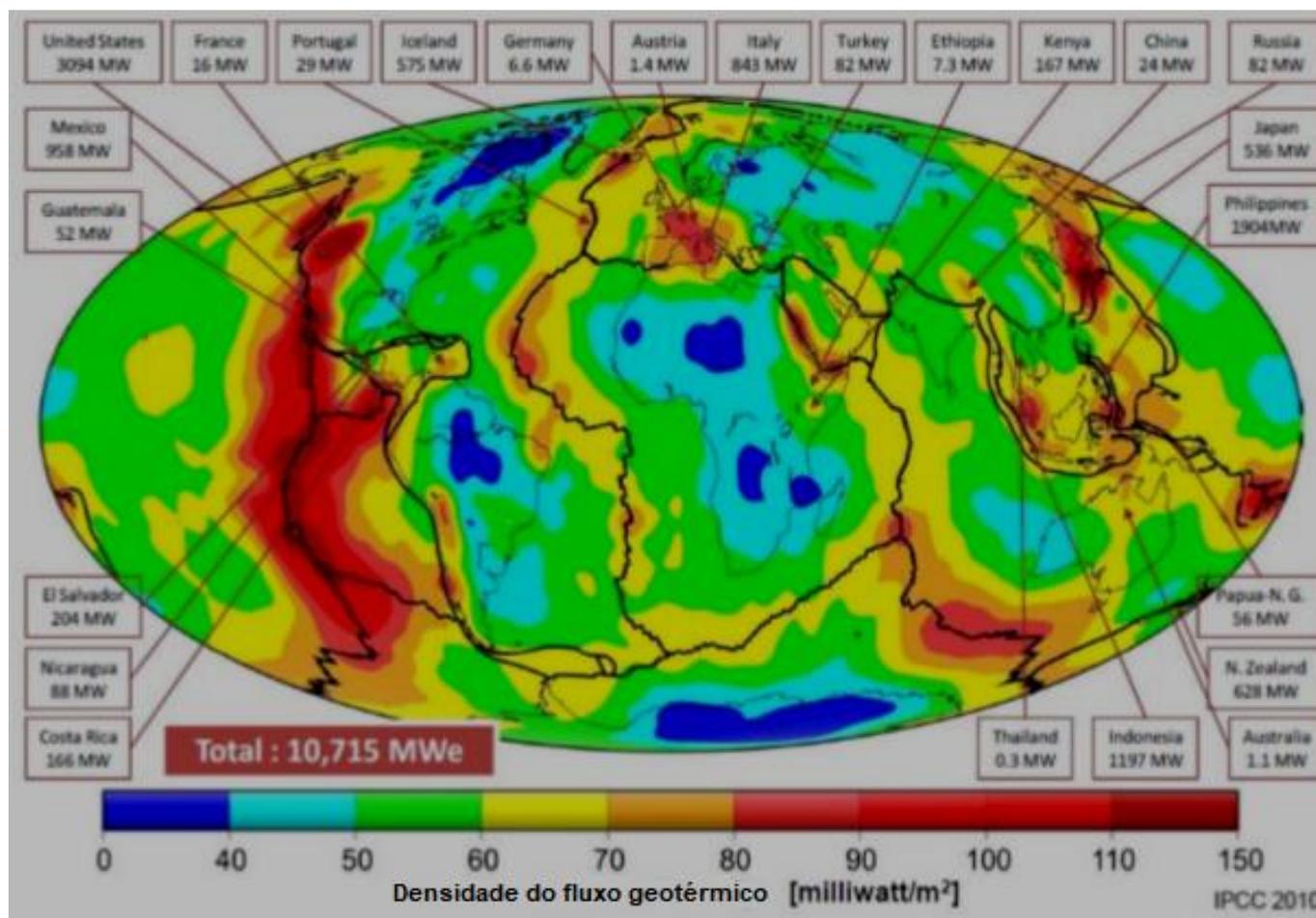


Figura 4 - Potencial geotérmico da Terra

Fonte: Menezes (2012).

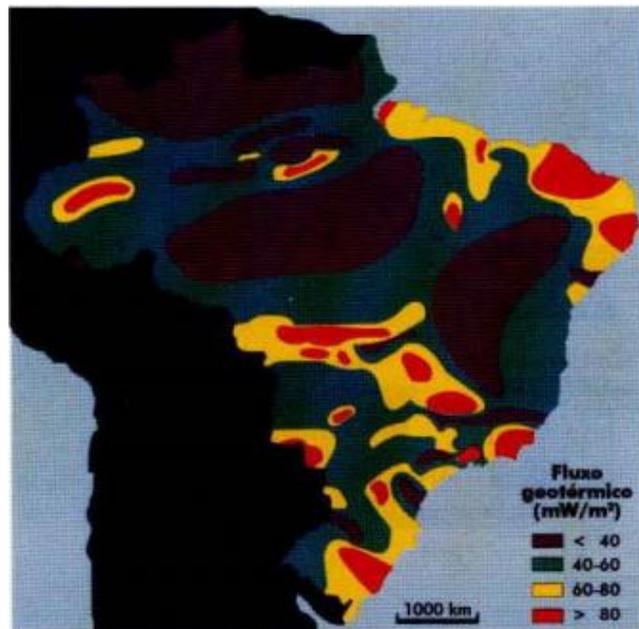


Figura 5 - Mapa do fluxo de calor do Brasil.

Fonte: Teixeira et al, 2000, p. 485.

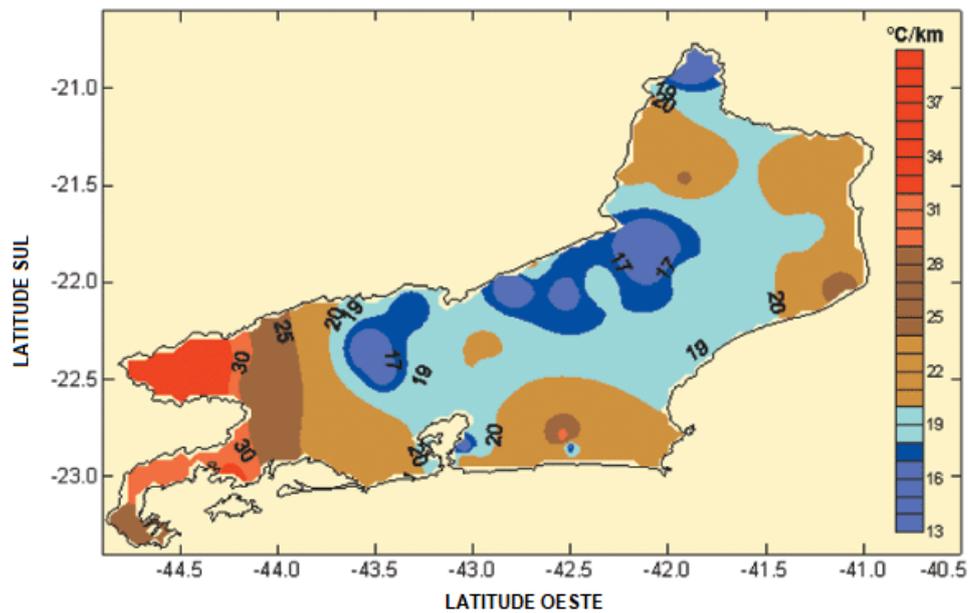


Figura 6 - Distribuição regional de gradientes geotérmicos com base em conjuntos de dados selecionados (métodos CVL, CBT e AQT).

Fonte: Adaptada Gomes e Hamza (2005).

Em algumas regiões, como Niterói, São Gonçalo, Jamapara, Água Quente e Silva Jardim, os gradientes encontrados são superiores a 50°C/Km (GOMES E HAMZA 2005).

De acordo com Ferreira (2003), o estado de Goiás pode ter zonas de considerável potencial para exploração de recursos geotérmicos de baixa entalpia. A Figura 7 apresenta que a parte sudeste de Goiás é muito promissora para esse assunto, com valores acima de $160 \times 10^{19} \text{ J/m}^2$. Por outro lado, há predominância de regiões de recursos geotérmicos de baixa e/ou média entalpia, com valores que compreendem entre 10 e $170 \times 10^{19} \text{ J/m}^2$. Percebe-se ainda que o fluxo geotérmico do estado de Goiás é anômalo, acima de $90 \times 10^{19} \text{ J/m}^2$, em muitas áreas, apesar de ser tectonicamente estável.

Pode-se visualizar na Figura 7 uma região de intenso fluxo geotérmico, que é a cidade de Caldas Novas. Atrela-se a este fato um sistema convectivo, em que a água fria chega a maiores profundidades, aquece e volta à superfície. Portanto, não há atividade tectônica na região que gera tal acontecimento.

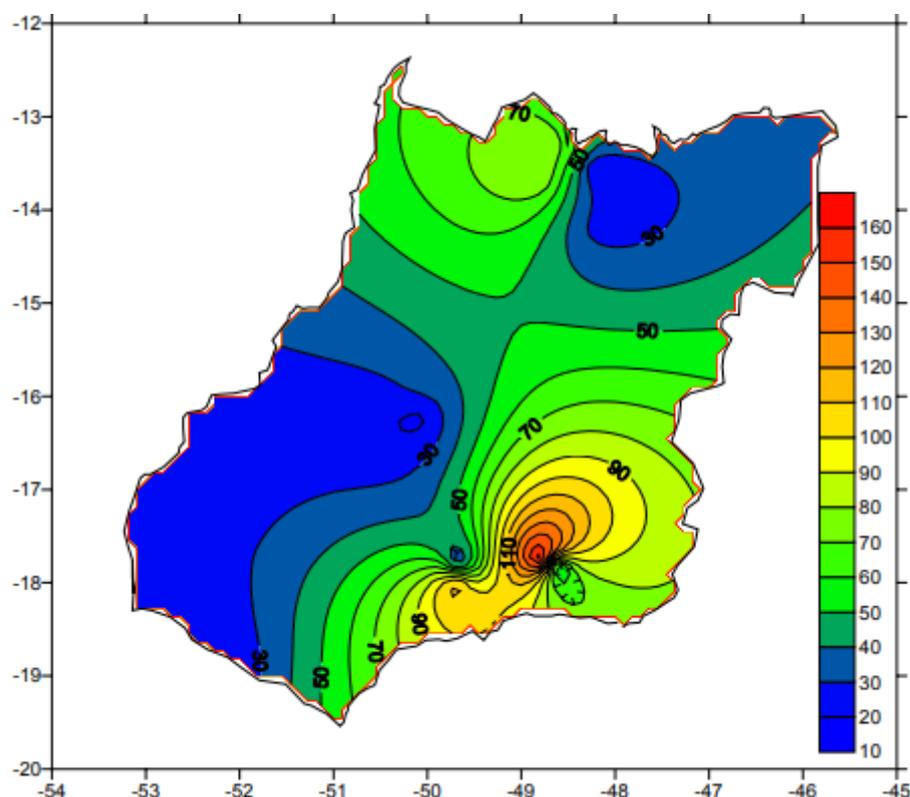


Figura 7 - Mapa da base de recursos geotérmicos de Goiás. Os valores de contorno são em unidades de 10^{19} J/m^2 .

Fonte: Ferreira (2003).

Conforme Gomes (2009), existem ainda recursos energéticos com importante fluxo de calor na bacia do Paraná. A distribuição geográfica desse fluxo está exposta na Figura 8 e, é possível analisar que ela detém anomalias isoladas ao longo de suas fronteiras leste e norte, com valores acima de 100 mW/m^2 .

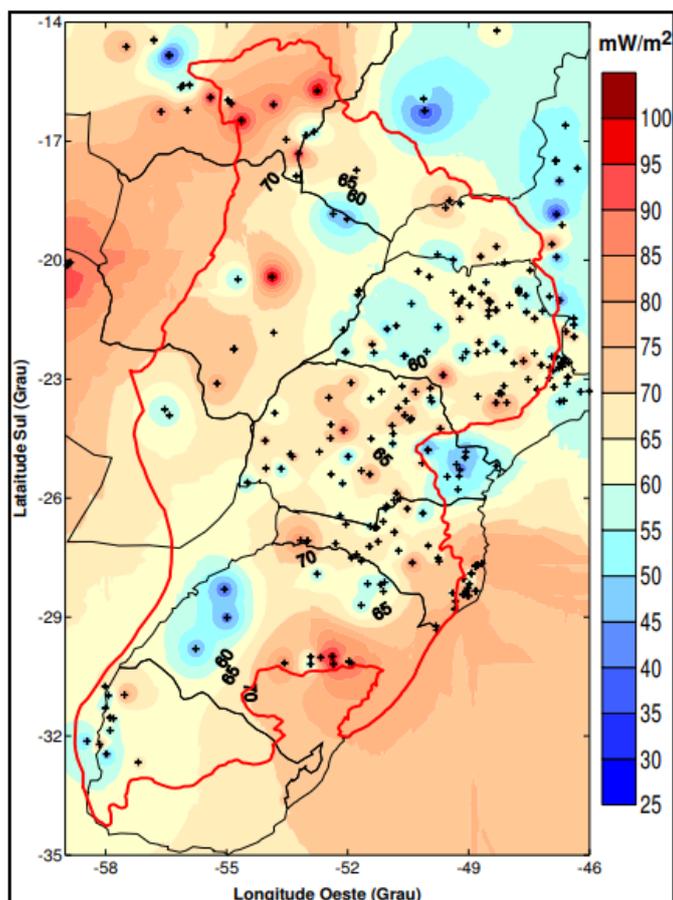


Figura 8 - Mapa preliminar do fluxo de calor da Bacia do Paraná. Os contornos estão em unidades de mW/m^2 .

Fonte: Adaptada Hamza e Gomes (2009).

Conforme Alexandrino e Hamza (2008), as regiões central e norte do estado de Minas Gerais apresentam grande potencial para a utilização da energia geotérmica, visto que possui fluxo geotérmico superiores a $80 \text{ mW}/\text{m}^2$. A Figura 9 representa a distribuição do fluxo de calor, ratificando os altos valores do mesmo.

Os recursos energéticos de alta temperatura, convencionalmente dito acima 150°C , é utilizado para gerar energia elétrica. A temperatura moderada (entre 90°C e 150°C) e os recursos de baixa temperatura (abaixo de 90°C) são os mais indicados para uso direto dessa fonte energética (ARBOIT *et al*, 2013).

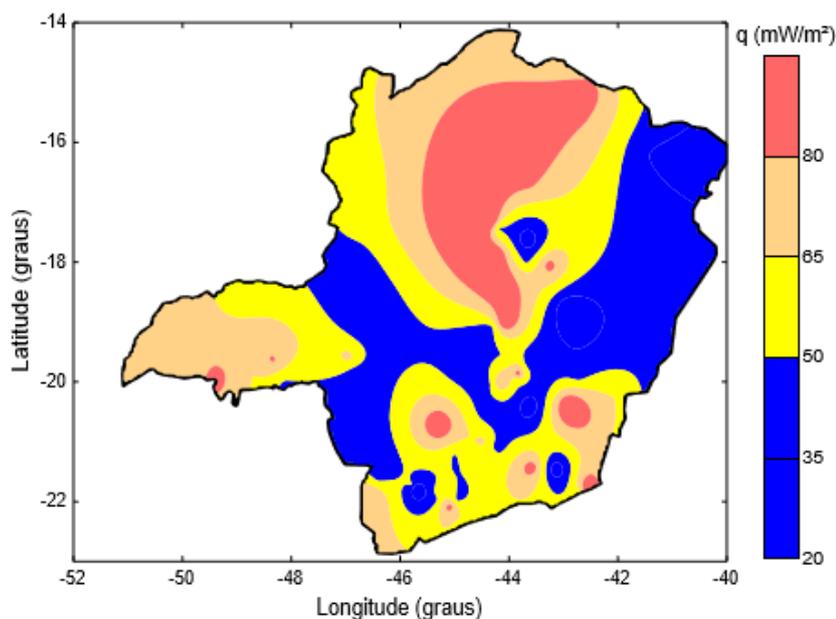


Figura 9 - Distribuição geotérmica do estado de Minas Gerais.

Fonte: Alexandrino e Hamza (2008).

Segundo Teixeira *et al* (2000), um fluxo relativamente alto de calor ocorre onde a fonte de calor, tal como o magma, é próxima a superfície (3-10 Km) e está em contato com as águas circulantes. Os gêiseres são um exemplo desse tipo de ocorrência, com atividade vulcânica recente ou outros pontos quentes na superfície. No contexto brasileiro, tal situação não é relevante, uma vez que estamos no centro da Placa Sul-americana e ela possui estabilidade tectônica.

3.6 Classificação dos recursos geotérmicos

Os sistemas a serem aplicados para o usufruto da energia geotérmica podem ser de convecção hidrotermal, sistemas ígneos quentes e sistemas de geopressurização.

O sistema convectivo hidrotermal é aquele que compreende reservatórios naturais de água e vapor. Pelo fato de na superfície a pressão ser menor, o vapor superaquecido flui para a superfície, o qual pode ser canalizado e levado diretamente para as turbinas. Assim, é possível produzir eletricidade (TEIXEIRA *et al* 2009, p.504). A depender da pressão exercida no fluido e da temperatura presente no reservatório pode-se ter o fluido na forma de vapor ou no estado líquido. O aproveitamento geotérmico utilizando este sistema é apresentado na Figura 10.

O sistema hidrotermal é dividido em vapor úmido ou vapor seco. Aquele ocorre quando a pressão no recurso geotérmico é grande e a temperatura chega até 370°C. Já o sistema hidrotermal do tipo vapor seco acontece quando a pressão não é superior à pressão atmosférica e a temperatura alcança valores acima de 165°C (TORRES, 2014).

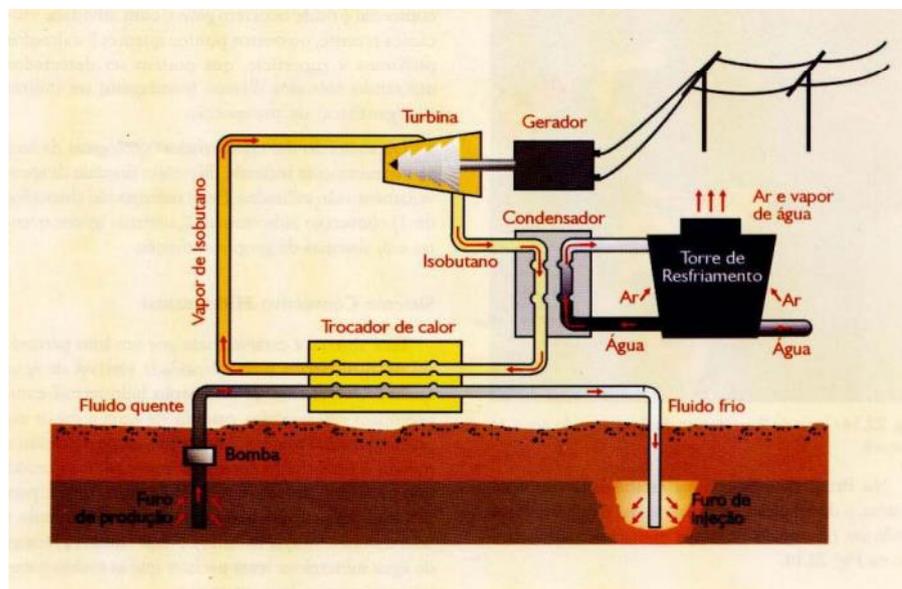


Figura 10 - Esquema do aproveitamento geotérmico pelo sistema convectivo hidrotermal.

Fonte: Decifrando a Terra, 2009, p.505.

Já o sistema ígneo quente, os reservatórios de rochas quentes e secas podem ser perfurados, formando poços profundos, entre os quais as fraturas seriam desenvolvidas artificialmente, por exemplo, hidrofraturamento, por explosivos. Em seguida, bombear água para entrar em contato com a rocha fraturada, e deixa-la equilibrar termicamente. Depois, bombeá-la novamente para a superfície, a temperaturas muito mais altas a fim de recuperar o calor (MANNING *et al*, 2007). A Figura 11 representa o sistema rocha quente seca também chamado de sistema ígneo quente.

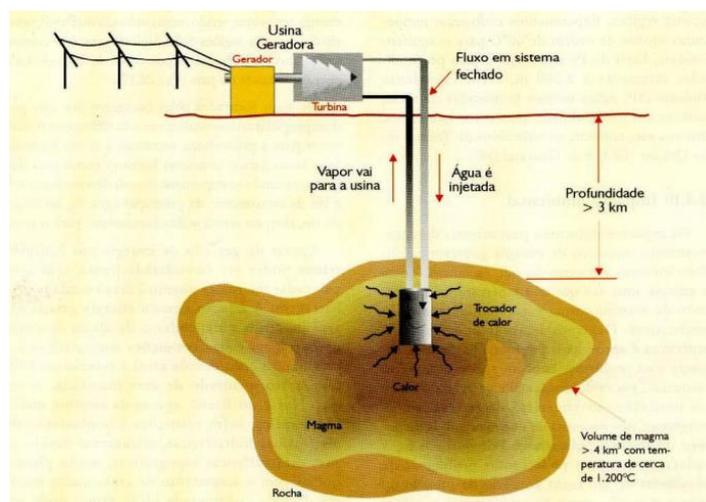


Figura 11 - Aproveitamento energético de um sistema ígneo quente.

Fonte: Decifrando a terra, 2009, p.506.

Por outro lado, o sistema geopressurizado acontece quando tem rochas impermeáveis que atuam como isolante térmico. A água aprisionada nessas rochas aumenta sua pressão e temperatura. Ademais, essa água pode conter gás metano que também pode ser aproveitado.

Em relação às áreas geotérmicas de baixa temperatura, pode-se associar à presença de ocorrências tectônicas, como falhas. A principal utilização da energia geotérmica de baixa temperatura, cuja temperatura está entre 40-100°C, é aquecimento/resfriamento de edifícios, agricultura, uso industrial, aquecimento de lagoa de aquicultura, etc. (KUNZE E RICHARDSON, 1975). A Figura 12 representa as regiões geotérmicas de alta e baixa temperatura no mundo.

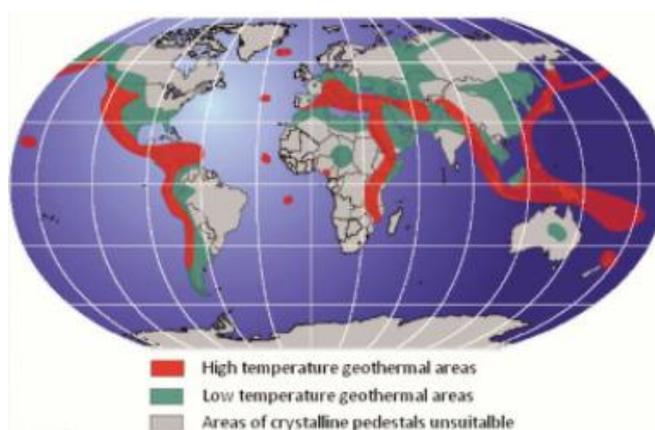


Figura 12 - Áreas de alta e baixa temperatura no mundo.

Fonte: Fuelling the Future: Advances in Science and Technologies for Energy Generation, Transmission and Storage, 2012.

Outra classificação, complementar àquela já explicitada, pode ser discutida nesse trabalho. De acordo com Singhal & Gupta (2010) apud Souza Filho (2012), os sistemas geotermiais podem ser relacionados em três grupos distintos, são eles de alta entalpia, baixa entalpia e sistemas de rochas secas e quentes.

Os sistemas de baixa entalpia compreendem temperaturas entre 50 e 150°C e são compostos por líquidos, ao passo que os sistemas de alta entalpia são predominantemente vapores e possuem temperatura entre 150 e 300°C. Em contrapartida, nos sistemas de rochas secas e quentes, a temperatura está entre 50 e 300°C. Nesse caso, um fluido é injetado por fraturas criadas ou não, sendo que o mesmo esquenta e chega à superfície junto com o vapor (SINGHAL & GUPTA 2010 apud SOUZA FILHO 2012).

3.7 Utilização da Energia Geotérmica

A energia geotérmica pode ser utilizada basicamente de duas maneiras distintas, são elas o aproveitamento direto dessa fonte energética ou para produção de eletricidade. Convencionalmente, para esta finalidade, o fluido de trabalho deve estar a uma temperatura de 180°C, ao passo que para a utilização direta, a temperatura ideal de entrada é de, aproximadamente, 80°C. (FRIDLEIFSSON *et al*, 2008)

Existem ainda outras possibilidades de usar a energia geotérmica. Entre elas pode-se citar o derretimento de neve em países que nevam constantemente. Tradicionalmente, utilizam sal nas estradas, porém isso tem trazido consequências para o meio ambiente, como a contaminação de rios, bem como a deterioração das rodovias. (GODWIN *et al*, 2002).

Na Figura 13, é possível ver os tipos de utilização direta da energia geotérmica bem como a geração de energia nos anos apresentados. De acordo com tal imagem, conclui-se que, no ano 2010 houve um aumento de geração de energia para bombas de calor, aquecimento de espaço, estufas e banhos e natação. Em contrapartida, as outras formas de utilização não houve um aumento significativo.

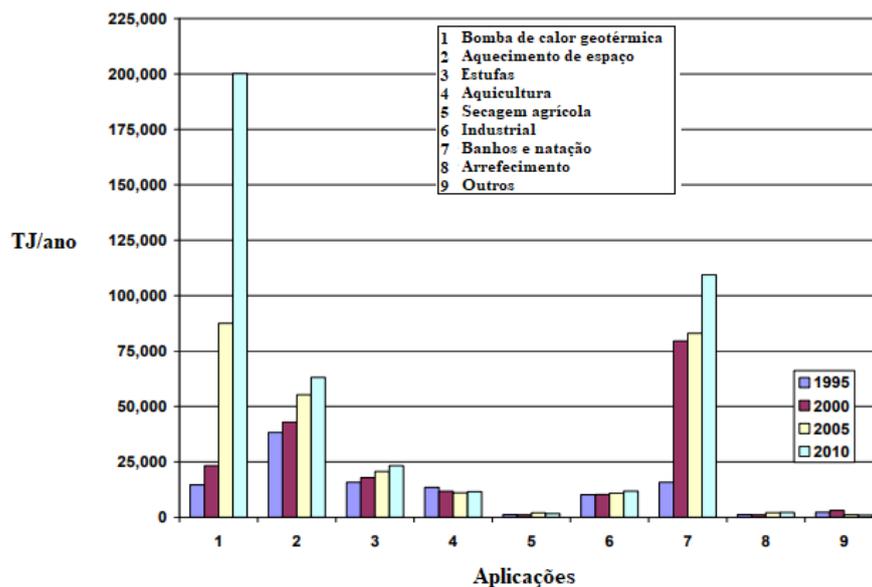


Figura 13 - Paralelo da energia mundial em TJ / ano para 1995, 2000, 2005 e 2010.

Fonte: Adaptada Lund e Boyd, 2010.

No caso da Figura 14, a maneira de utilização direta mais comum, no ano de 2010, foi a bomba de calor, seguido de banho e natação e aquecimento de espaço, valorados em 47,2%, 25,8% e 14,9%, respectivamente.

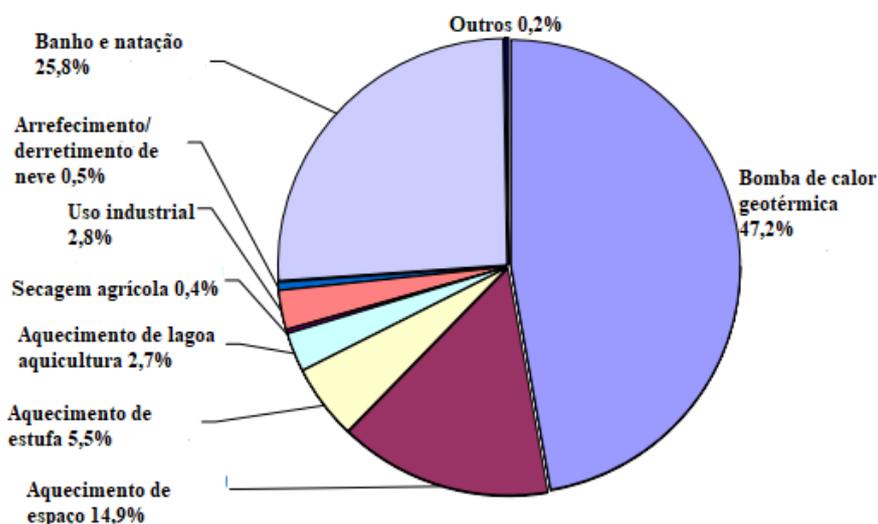


Figura 14 - Utilidades da energia geotérmica em todo o mundo no ano de 2010 em porcentagem do consumo total de energia.

Fonte: Adaptada Lund e Boyd, 2010.

Com isso, pode-se apontar a importância dessa fonte energética no mundo para as mais diversas utilidades e, como ela tem ganhado importância nos últimos anos. No que diz respeito à mineração, a energia geotérmica poderia ser utilizada, no caso da mina subterrânea,

para a geração de energia elétrica utilizada no sistema de ventilação, que por sua vez é vital para proporcionar condições dignas de trabalho, na iluminação, entre outras. Em relação a minas a céu aberto, poderia gerar eletricidade e, por meio de redes de transmissão, fornece energia para a mina. É importante ressaltar, que isso não é compulsório, e irá depender da distância do recurso geotérmico da mina a céu aberto, o que pode inviabilizar esse uso. Portanto, é mais compreensível que, a utilização da energia geotérmica, seja mais aplicada para minas subterrâneas, já que poderia aproveitar as perfurações realizadas durante o desenvolvimento da mina para o aproveitamento geotérmico.

A fim de tornar mais consolidadas as vantagens da energia geotérmica, ressalta-se que possui grande capacidade de produção de energia, que a longo prazo, minimiza os custos iniciais relacionados a ela.

A Figura 15, especialmente a região destacada, retrata que os sistemas de energia geotérmica possuem maior fator de capacidade (corresponde à relação entre a produção de energia por um período e sua produção potencial) se comparados com os combustíveis fósseis, os quais são poluidores consideráveis do meio ambiente. Com isso, é possível enfatizar que a energia geotérmica tem alto fator de capacidade, o que traz à tona a sua grande relevância como energia renovável para a sustentabilidade.

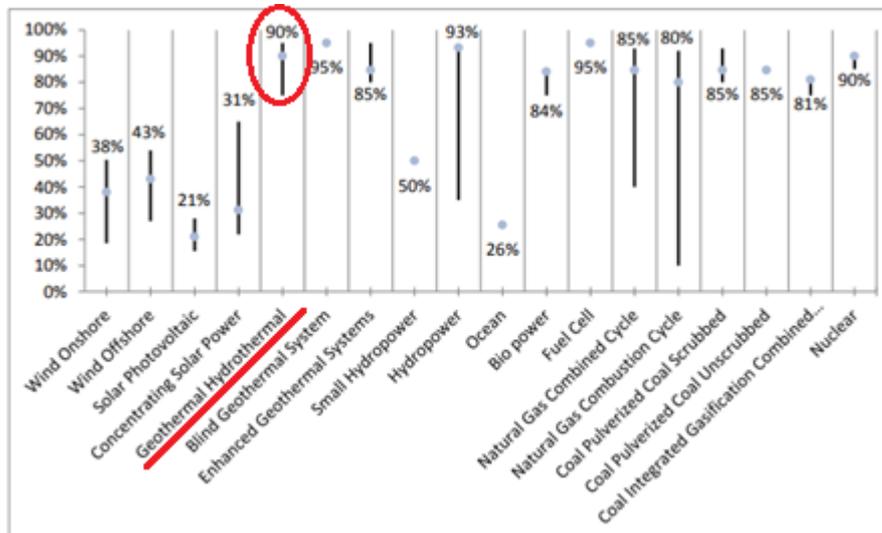


Figura 15 - Fator de capacidade de algumas fontes energéticas.

Fonte: Geothermal Energy Association, (2013).

3.8 Sistemas de Energia Geotérmica

Apesar de o usufruto da energia geotérmica ter ganhado importância, essa tecnologia já era utilizada anteriormente. Segundo Teixeira *et al* (2000), o interesse pela energia geotérmica aumentou na crise energética da década de 1970, devido à elevação do preço do petróleo.

As bombas de calor utilizadas para aproveitar o calor acumulado no interior da Terra como fonte de energia são chamadas de Bombas de Calor Geotérmicas. O sistema de recuperação desse calor geotérmico pode ser dividido em “closed loop system” e “open loop system” (MILENIC *et al*, 2010).

“Os sistemas que usam um trocador de calor dentro do solo são chamados de sistemas ‘fechados’, enquanto que a produção de água do solo com um trocador de calor acima do solo é chamada de sistemas ‘abertos’” (GEOTHERMAL COMMUNITIES, 2010).

3.8.1 Closed Loop System

O fluido transportador de calor circula dentro de um tubo enterrado para transportar o calor do subsolo para um sistema de aquecimento a fim de aquecer/resfriar um espaço, fornecer água quente para casas, fábricas, edifícios públicos e comerciais. Ao usar bombas de calor, a água quente pode ser gerada enquanto baixa a temperatura em alguns graus (HALL *et al*, 2010). Conforme pode-se visualizar na Figura 16, tal esquema representa um sistema fechado de aproveitamento da energia geotérmica.

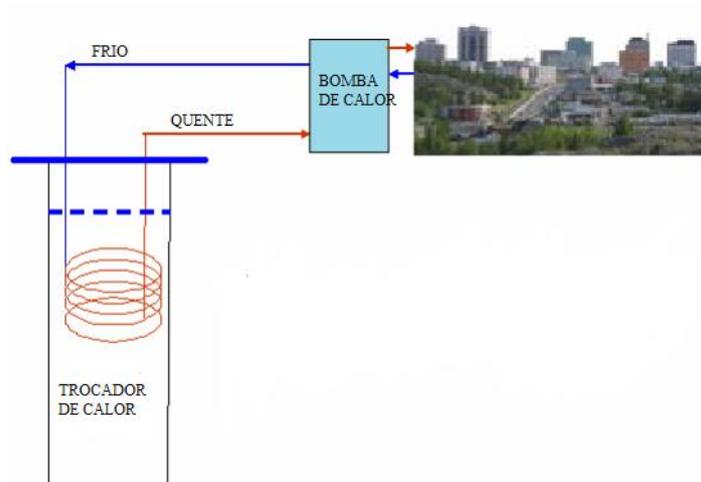


Figura 16 - Representação do “closed loop system”.

Fonte: adaptada Hall, Scott e Shang (2010).

3.8.2 Open Loop System

Esse tipo de sistema é apropriado quando se tem um grande volume de água de qualidade razoável. A instalação do sistema “open loop” é encontrada em minas exauridas em que a água presente não possua problemas em suas características, tais como porcentagem de sólidos, potencial hidrogeniônico (HALL *et al*, 2010).

De acordo com Hall *et al* (2010), durante o inverno a água é retirada do fundo do poço, onde está aquecida, e injetada para a maior elevação. No verão, o processo é inverso, isto é, a água fria volta para a formação geológica a partir da qual foi retirada, conforme pode-se visualizar na Figura 17.

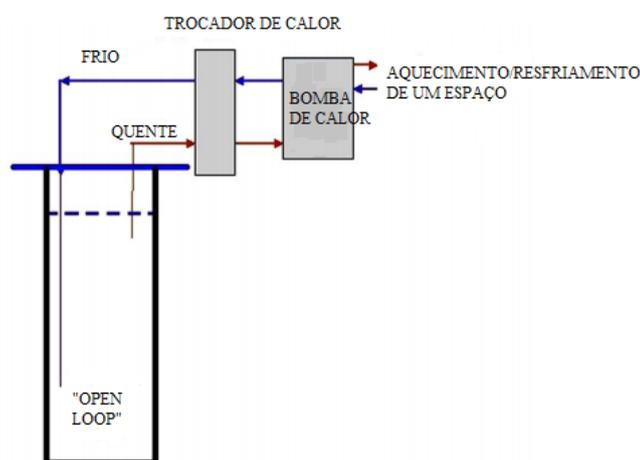


Figura 17 - Representação do sistema "open loop".

Fonte: adaptada Hall, Scott e Shang (2010).

Em contrapartida, segundo Duarte *et al* (2011), os principais sistemas geotérmicos são: trocador de calor subterrâneo para água com uso de bomba de calor, trocador de calor de águas subterrâneas, trocador de calor de águas superficiais e trocador de calor subterrâneo para ar, os quais serão explicitados no próximo tópico.

3.8.3 GFHE (Ground to Fluid Heat Exchangers / trocador de calor subterrâneo para água com uso de bomba de calor)

Este sistema é caracterizado por utilizar um fluido intermediário para a transferência de calor, por meio de uma unidade de trocador água-ar. Este circuito é fechado, sem renovação

do fluido. Neste caso, o trocador de calor pode ser vertical, horizontal ou “Slinky” (DUARTE *et al*, 2011). É possível visualizar na Figura 18 essas classificações abordadas.

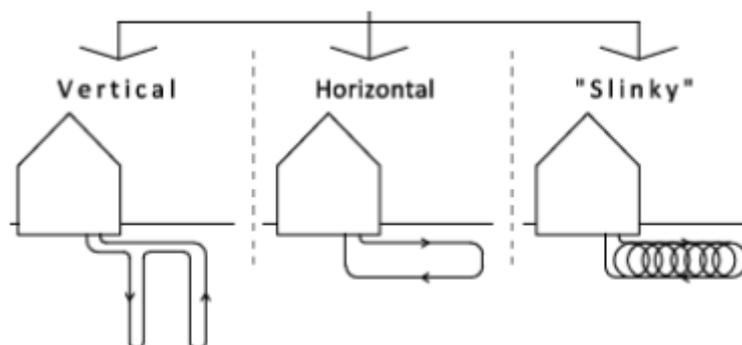


Figura 18 - Representação de trocador de calor para sistema GFHE.

Fonte: DUARTE *et al*, (2011).

Os sistemas geotérmicos mais superficiais empregam-se, mais comumente, o sistema fechado horizontal, figura 19 (B), podendo ser em série ou paralelo. Neste caso, em relação aos verticais, representado pela Figura 19 (A), necessita-se de menos investimento, e às vezes, é pouco eficiente, devido a temperatura do fluido ser menor, classificado em baixa ou média entalpia. No que diz respeito ao *closed horizontal-slinky system*, Figura 19 (C), é o mais compacto e possui maior eficiência quando o solo de onde o recurso geotérmico está inserido é de baixa permeabilidade, como argila e silte.

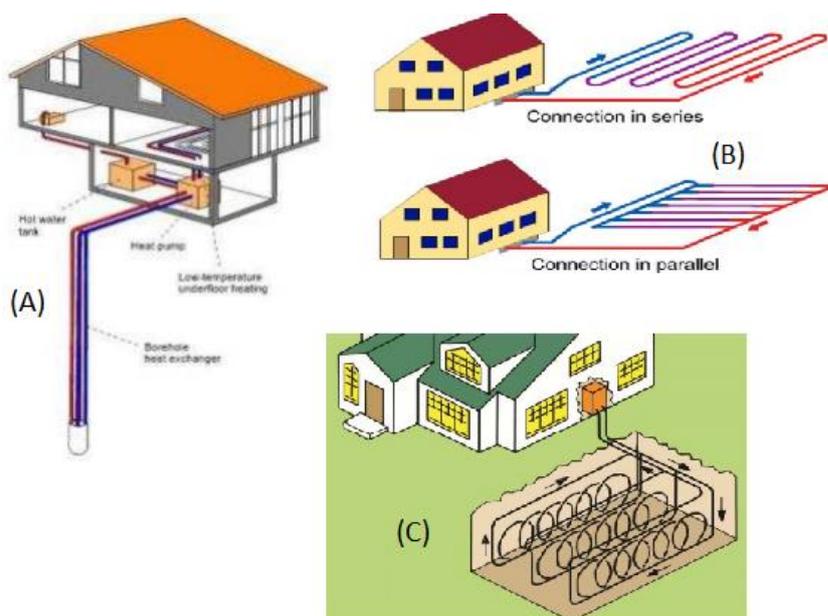


Figura 19 - Esquema do (A) Closed loop vertical system (B) Closed loop horizontal system e (C) closed horizontal-slinky system.

Fonte: Geothermal Communities (2010).

3.8.4 GWHE (Groundwater heat exchangers / trocador de calor de águas subterrâneas)

Estes sistemas, de operação tipo aberto, trabalham diretamente com água de fontes subterrâneas, a qual é incorporada a instalação interna do recinto e depois descartada. Nesse sistema, pode-se ter a configuração de dois poços e um poço, conforme pode-se ver na Figura 20 (DUARTE *et al*, 2011).

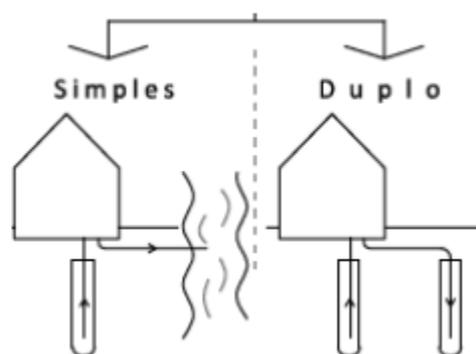


Figura 20 - Esquema de trocador de calor para sistema GWHE.

Fonte: DUARTE *et al*, (2011).

“Os sistemas de águas subterrâneas são mais eficientes que os sistemas de circuito fechado. A tecnologia de poços subterrâneos ‘normais’ é usada para extração de energia. A temperatura da água subterrânea é praticamente constante durante todo o ano e, como tal, é a melhor transportadora de energia térmica” (GEOTHERMAL COMMUNITIES, 2010).

A Figura 21 mostra outro esquema do aproveitamento do calor contido em lençóis freáticos, em que após a utilização do fluido, o mesmo volta ao reservatório de origem. Para o usufruto deste, é necessário saber a composição química deste fluido, uma vez que, qualquer incidente nestes poços, podem contaminar toda área ao redor.

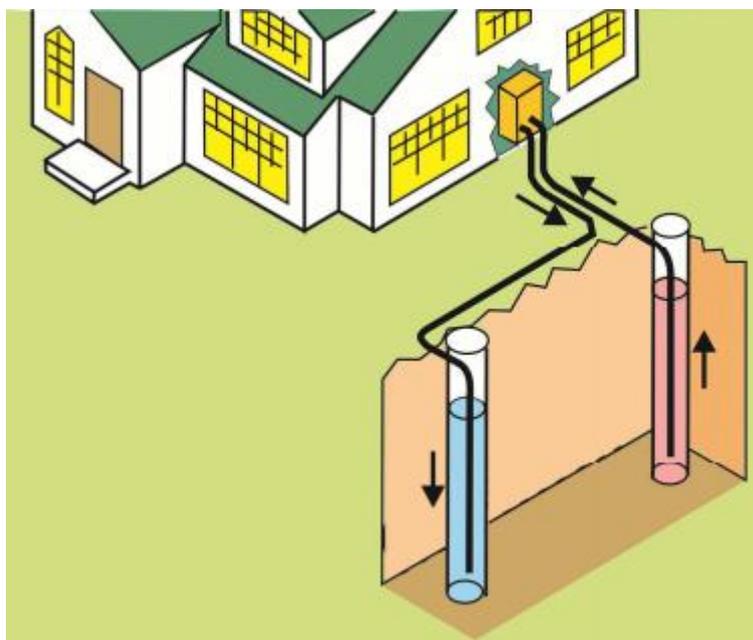


Figura 21 - *Open loop system* de águas subterrâneas.

Fonte: Geothermal Communities (2010).

3.8.5 SWHE (Surface Water Heat Exchangers / trocador de calor de águas superficiais)

De acordo com Duarte *et al* (2011), o SWHE é um sistema fechado que utiliza o acúmulo de água na superfície para o aproveitamento do calor no fluido, podendo ser classificado em direto ou indireto. A Figura 22 retrata os dois tipos existentes de trocador de calor de águas superficiais.

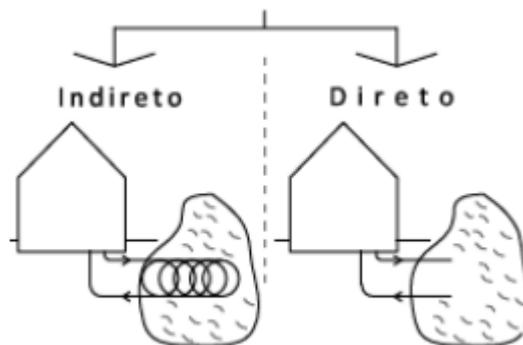


Figura 22 - Representação de trocador de calor para sistema SWHE.

Fonte: DUARTE *et al.*, (2011).

Conforme a Geothermal Communities (2010), para ser possível a aplicação desse sistema é crucial que exista água superficial disponível próximo ao local de uso e os tubos devem estar totalmente submersos em água a uma profundidade, de pelo menos, 2,4 m abaixo da superfície.

3.8.6 GAHE (Ground to Air Heat Exchanger / trocador de calor subterrâneo para ar)

Estes são sistemas que trabalham “diretamente” porque a transferência de calor do solo para o ar ocorre sem um fluido intermediário, o que o torna menos eficiente que os outros sistemas (DUARTE *et al.*, 2011).

Percebe-se que, esse sistema é o mesmo do GWHE, tendo como única diferença o fluido de trabalho, conforme pode-se visualizar na Figura 23.

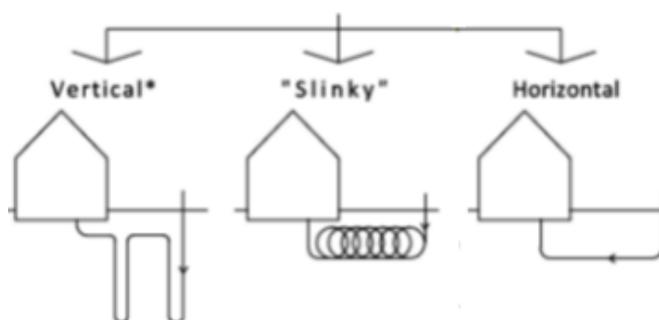


Figura 23 - Esquema de trocador de calor para sistema GAHE.

Fonte: DUARTE *et al.*, (2011).

Em vista do que foi exposto, é notório que os autores classificaram os sistemas geotérmicos cada um da maneira que foi julgado como melhor, no entanto, as classificações

propostas são extensões uma das outras. Por isso, ambas são coerentes e podem ser utilizadas para o desenvolvimento de um empreendimento geotérmico.

A partir da temperatura do fluido, profundidade do reservatório e da geologia deste torna-se viável, sem analisar o ponto de vista econômico, a instalação de algum tipo de sistema geotérmico. Com isso, nota-se a grande necessidade de um estudo prévio bem detalhado do recurso geotérmico que futuramente será aproveitado, a fim de evitar riscos e custos desnecessários.

Por exemplo, os sistemas de circuito fechado são, em geral, aplicáveis em todos os tipos de geologia, ao passo que sistemas abertos requerem uma geologia contendo um ou vários aquíferos. Para a concepção de sistemas abertos o tipo de aquífero, geometria, nível e gradiente de água subterrânea, propriedades hidráulicas são importantes, entretanto, para sistemas de malha fechada, esses parâmetros são de menor importância (GEOTHERMAL COMMUNITIES, (2010).

3.9 Custos e Riscos da Energia Geotérmica.

O principal parâmetro que, impreterivelmente, influencia na utilização da energia geotérmica são os custos atrelados a sua instalação e aos riscos financeiros que traz consigo.

Existem muitos fatores que fazem com que os custos de desenvolvimento geotérmico variem substancialmente de um lugar para outro e de projeto para projeto, podem ser os custos durante o desenvolvimento geotérmico, variação dos custos globais nas várias etapas do projeto e os diferentes tipos de riscos financeiros que precisam ser tratados (GEOTHERMAL COMMUNITIES, 2010).

Entre esses fatores pode-se citar a dimensão da planta geotérmica bem como as tecnologias disponíveis para o desenvolvimento da mesma, uma vez que, por necessitar de tecnologias de ponta, a falta desta inviabiliza, com certeza, a progressão da planta geotérmica. Outrora, o conhecimento prévio do recurso geotérmico do qual pretende usufruir, como temperatura, profundidade, são informações vitais podem variar os custos daquela. Além disso, incentivos fiscais e políticas ambientais também são fatores importantes e que determinam o desenvolvimento geotérmico.

É importante ressaltar que a energia geotérmica possui pontos positivos a serem considerados para a utilização da mesma. A Figura 24 mostra que a energia geotérmica, seja ela *binary* (outro fluido troca calor com o sistema aquecido e o vapor gerado movimentada a

turbina) ou *flash* (água quente em profundidade vaporiza enquanto ascende à superfície e o vapor gira a turbina), possui custo mais baixo da instalação de uma planta em relação outras fontes citadas, energia do vento, nuclear, solar e hidráulica.

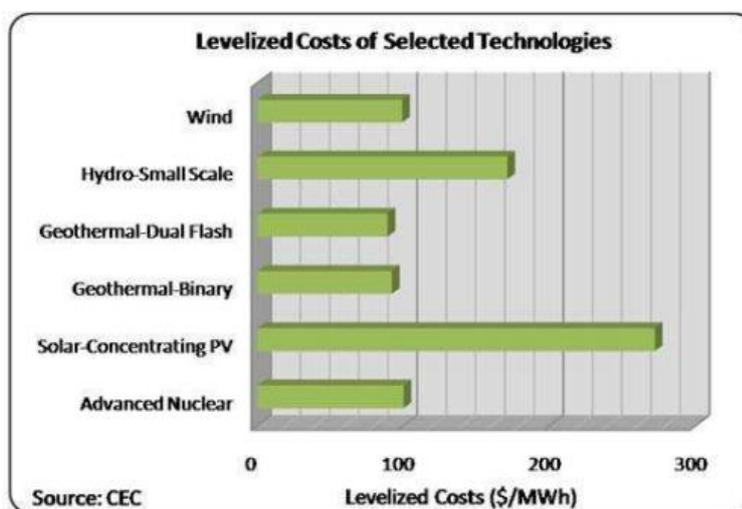


Figura 24 - Custos de fontes alternativas de energia.

Fonte: Geothermal Communities, (2010)

De acordo com a Geothermal Communities (2010), com relação aos custos do desenvolvimento geotérmico, categorias podem ser mencionadas, como os custos de estabelecimento, como concessão ou aquisição de arrendamento, estudos ambientais e facilidades de apoio, custos de exploração, que fazem referência a estudos de viabilidade econômica e perfuração (superficial ou profunda).

Os custos de sistemas de produção e injeção dizem respeito a estudos de mobilização, perfuração e testes (nos poços ou do próprio recurso, por exemplo), custos para adquirir e instalar plantas geotérmicas, que se referem tubulação de injeção e produção, bombas de injeção e produção bem como inibição de corrosão dos poços, custos para conectar a usina na rede de transmissão e de administração, que envolve gerenciamento de projetos, custos de seguro, taxas de financiamento diferentes. Estes custos fazem com que essa fonte energética, embora tenha grande capacidade de produção, seja pouco empregada como uma fonte alternativa de energia.

A Figura 25 corrobora o que já foi dito, no que diz respeito aos tipos de custos que podem acometer o desenvolvimento de uma planta geotérmica e que é preponderante para o sucesso ou fracasso do mesmo. Esses fatores podem ser os grandes responsáveis para os poucos estudos existentes e conseqüentemente, a utilização insignificante da desta fonte energética, uma vez que os investidores desanimam com todos esses percalços. Ademais, a

Figura 25 retrata a proporção de cada custo no progresso de uma planta geotérmica. Pode-se perceber que a instalação de uma planta geotérmica responde por 38% de todo o custo, seguido por custos de perfuração e de sistemas de produção e injeção, valorados em 30 e 11%, respectivamente.

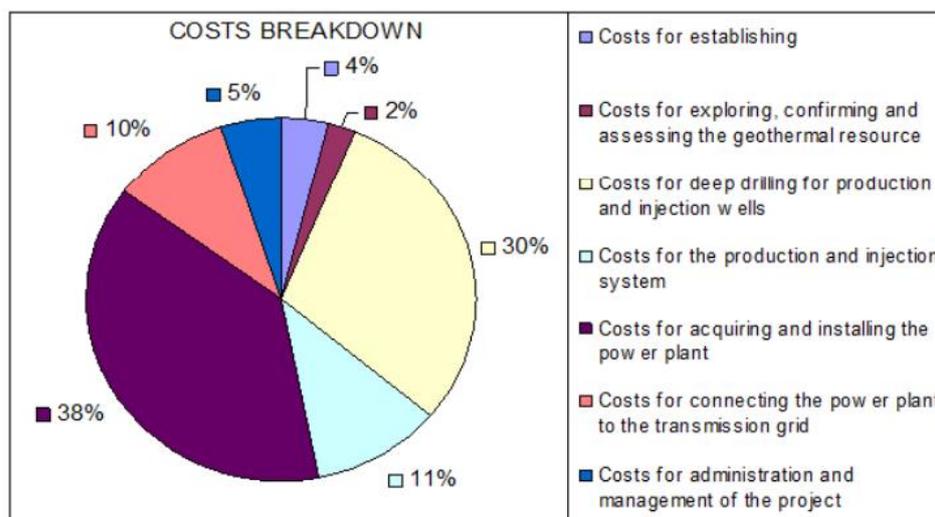


Figura 25 - Custos da utilização da energia geotérmica.

Fonte: Geothermal Communities, (2010).

“Com relação aos riscos financeiros, algumas razões para a pouca utilização da energia geotérmica podem ser citadas, como requisitos sensíveis ao tempo para manutenção de uma concessão, requisitos em um contrato de compra de energia que podem dificultar o empreendimento e um descompasso entre os termos de um contrato de investimento e de um contrato de empréstimo” (GEOTHERMAL COMMUNITIES, 2010).

O alto custo inicial, bem como o risco inicial significativo, em sua maioria, faz com que os investidores não apliquem capital nessa fonte energética, que pode ter custo inicial de 4 a 6 vezes maior que o de uma usina de gás natural de ciclo combinado de produção comparável (KAGEL E GAWELL, 2005).

Porém, a utilização da energia geotérmica, pode ser de baixo custo principalmente se o recurso de água ou vapor quente estiver próximo à superfície. Esse recurso energético pode diminuir a dependência de combustíveis fósseis e a pobreza energética em áreas remotas, fornecendo energia às comunidades próximas, minimizando as perdas e custos de transmissão (SHORTALL *et al*, 2014).

3.10 Impactos da Utilização da Energia Geotérmica

É vital salientar que, assim como outras fontes de energia, a geotérmica dispõe de impactos que influenciam de forma benéfica ou maléfica aqueles que a detém.

3.10.1 Impactos na pobreza e distribuição de renda

No decorrer da extração do recurso geotérmico, os efeitos que acometem o local onde possui tal fonte energética podem estar pautados nos níveis de renda per capita da região. Os impactos podem ser diretos, como admissão de novos funcionários, ou indiretos, aumento de renda para fornecedores de bens e serviços na área ou ainda devido ao acesso a água quente e energia elétrica. Dispendios com combustível, alimentação, alojamento, aquisição de equipamentos, podem fomentar a economia local. No entanto, a continuidade desses efeitos está atrelada à existência do recurso geotérmico (SHORTALL *et al*, 2014).

Conforme Shortall, Davidsdottir e Axelsson (2014), as contribuições podem vir na forma de royalties e impostos, as quais são exigidas pelo governo, ou até mesmo ajuda voluntária por parte da empresa, proporcionando desenvolvimento social e econômico daquela região. É notório que os impactos citados trazem consigo uma gama de oportunidades para locais remotos e de baixa renda, causando, dessa forma, crescimento na economia local, assim como na vida social das pessoas inseridas naquele meio.

3.10.2 Efeitos na saúde, educação, atmosfera e meio ambiente

A fim de analisar a proficuidade do desenvolvimento geotérmico, indicadores como saúde e educação também são importantes para essa avaliação.

O acesso à eletricidade e a água quente melhora a esterilização de alimentos, purificação e o abastecimento de água e saneamento, além de permitir a refrigeração de medicamento essenciais. Em áreas longínquas, afastadas da rede pública, vilarejos e

instalações, como hospitais, poderiam substituir seus geradores a diesel por usinas geotérmicas de pequena escala, aumentando o acesso à eletricidade e reduzindo os impactos ambientais e de saúde (SHORTALL *et al*, 2014).

No Quênia, o acesso à energia elétrica em áreas remotas, a partir das usinas geotérmicas, melhorou a infraestrutura dos hospitais locais e, conseqüentemente, a mortalidade infantil e maternal reduziram de forma significativa (OGOLA *et al*, 2011).

Em decorrência do que foi discutido, o impulsionamento da utilização da energia geotérmica pode ser relevante no que diz respeito ao desenvolvimento social e econômico de populações carentes. No entanto, é necessário regulamentos mais flexíveis e que permitam o crescimento dessa fonte energética. Portanto, é muito válido os pontos positivos abordados, devido à redução, ainda que não seja tão significativa, das desigualdades que acometem muitas comunidades.

Por outro lado, dependendo do fluido utilizado nas usinas geotérmicas, projetos geotérmicos podem liberar para a atmosfera gases nocivos à saúde, tal como o gás sulfídrico (H_2S), que possui odor desagradável, mas, em quantidades acima do limite, causa conseqüências significativas, como doenças respiratórias, cardiovasculares e do sistema nervoso (SHORTALL *et al*, 2014).

O dióxido de enxofre (SO_2), outro poluente em potencial, não é liberado diretamente na atmosfera, quando se trata da utilização da energia geotérmica. Em plantas geotérmicas, o gás sulfídrico emitido é transformado naquele dióxido de enxofre e, conseqüentemente, é muito prejudicial à saúde de todos (KAGEL E GAWELL, 2005). Para exemplificar esse contexto, a Figura 26 mostra que, embora a energia geotérmica possa ser também poluidora, causa menos dano se comparado às outras fontes de energia.

O carvão mineral e o óleo são os recursos energéticos que mais convertem o gás sulfídrico em dióxido de enxofre, ao passo que o gás natural e a energia geotérmica são menos lesivos. Diante disso, é conveniente ressaltar que o recurso geotérmico poderia ser uma fonte energética mais prudente a ser utilizada sob o ponto de vista ambiental.

Ainda sob a perspectiva ambiental, plantas de energia geotérmica não emitem particulados para a atmosfera, de acordo com a Figura 27. Pode-se concluir que o carvão libera cerca de 1,0115 Kg/MWh enquanto o gás natural emite 0,064 Kg/MWh, bem menos em relação à primeira. Em contrapartida, a energia geotérmica não possui emissões de material particulado, o que se mostra muito bom, pois não compromete de forma incisiva nas condições de vida humana, tampouco na perpetuação da natureza.

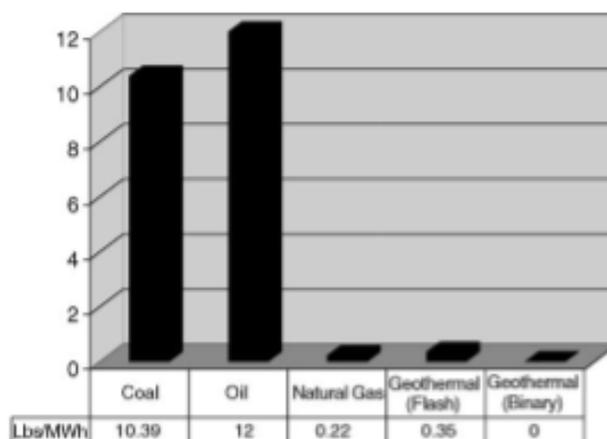


Figura 26 - Comparação entre as fontes energéticas em relação à conversão de gás sulfídrico em dióxido de enxofre.

Fonte: Kagel e Gawell (2005)

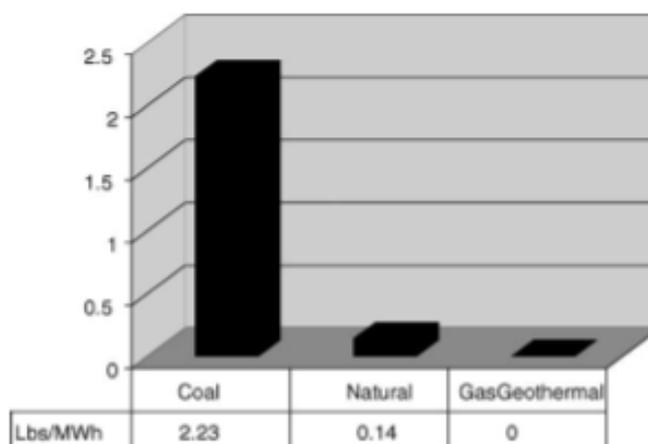


Figura 27 - Comparação de caldeira de carvão pulverizado, ciclo combinado de gás natural e energia geotérmica em relação às partículas emitidas.

Fonte: Kagel e Gawell (2005).

Com o objetivo de consolidar as informações citadas, a tabela 2 expõe que, em relação ao material particulado, não há emissão pelo uso da energia geotérmica, conforme já foi dito anteriormente, na imagem 27. No que diz respeito ao dióxido de enxofre (SO_2), o carvão mineral libera mais desse gás, se comparado ao dado da Figura 21, com valor de 8,5 Kg/MWh. Já em relação às plantas geotérmicas, não houve variação da emissão do dióxido de enxofre.

No que se refere à emissão de dióxido de carbono (CO_2), de acordo com a quadro 1, o carvão libera cerca de 997,7 kg/MWh, ao passo que a planta geotérmica *flash* emite 27,21

kg/MWh. Já a planta geotérmica *binary* não libera nenhuma quantidade de dióxido de carbono.

Após essas informações, pretendo enfatizar que, embora as informações não são coincidentes em alguns casos, a energia geotérmica é menos danosa, o que poderia remeter a uma utilização mais comum.

Tabela 2 - Níveis de emissão por poluente e fonte de energia.

[lbs/MWh]	VAPOR SECO	FLASH	BINARY	GÁS NATURAL	CARVÃO
CO ₂	59.82	396.3	-	861.1	2200
CH ₄	0.0000	0.0000	-	0.0168	0.2523
PM _{2.5}	-	-	-	0.1100	0.5900
PM ₁₀	-	-	-	0.1200	0.7200
SO ₂	0.0002	0.3500	-	0.0043	18.75
N ₂ O	0.0000	0.0000	-	0.0017	0.0367

Fonte: Adaptada Climate Registry 2012, EIA 2013c, EPA 2009, EPA 2011, NRC 2010.

3.10.3 Subsidiência

Foram citados alguns impactos negativos da utilização da energia geotérmica, no entanto, a ocorrência da subsidiência também é preocupante. O processo de subsidiência corresponde ao movimento vertical descendente, relativamente lento, devido às deformações ou deslocamento de direção (INFANTI JR & FORSANARI FILHO, 1998).

Com a extração de calor da rocha, o maciço rochoso diminui a temperatura dele e, como consequência, a contração da rocha é inevitável. Dessa forma, o alívio de pressão que acomete esse equilíbrio gera o fenômeno de subsidiência (COSTA *et al*, 2009). Embora possa ocorrer naturalmente, a subsidiência também pode ocorrer como resultado da extração de fluidos subterrâneos, conforme é possível visualizar na Figura 28.



Figura 28 - Subsidência causada por uma perfuração geotérmica.

Fonte: Geothermal Communities (2010)

3.10.4 Sismicidade

Abalos sísmicos de pequena magnitude podem ser originados, entre outros motivos, em decorrência da utilização da energia geotérmica. O aluimento da terra tem sido, por vezes, causado pela injeção e produção das operações em plantas geotérmicas (GEOTHERMAL COMMUNITIES, 2010).

Tendo em vista que a ocorrência de tremores de terra pode ser prejudicial à população que mora próxima a esses campos geotérmicos, como por exemplo diminuição da estabilidade de casas em virtude de trincas, algo deve ser feito para minimizar esse fato adverso.

Dado esse evento, a injeção de água onde estão sendo extraídos fluidos subterrâneos pode ser uma ação mitigatória do aluimento do solo (COSTA *et al*, 2009).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os trabalhos consultados, a energia geotérmica é pouco utilizada no mundo, assim como, não é bem aproveitada no Brasil. Isso deve ao fato de que, inicialmente, a planta geotérmica é muito dispendiosa e possui um risco primário considerável, o que desencoraja muitos investidores a aplicarem alta quantia monetária. Apesar disso, a energia geotérmica possibilita grande capacidade de produção de energia, principalmente em relação aos combustíveis fósseis e outras fontes alternativas.

Os combustíveis fósseis, os quais são fontes de energia não renováveis, geram malefícios ao meio ambiente, tem um alto custo e, em virtude disso, tem-se preocupado bastante em diminuir o uso desse tipo de recurso energético. A crescente busca por fontes alternativas de energia, especialmente a energia geotérmica, tem aumentado significativamente estudos acerca desse assunto. O objetivo desta revisão foi retratar aspectos envolvendo o aproveitamento da energia geotérmica no contexto atual da engenharia e proporcionar discussão sobre a possibilidade de sua aplicação no suprimento da energia elétrica. Recentemente, pesquisas no âmbito da energia geotérmica têm ocorrido com mais frequência, porém ainda é insuficiente para proporcionar desenvolvimento nessa área. Dessa forma, mesmo que amplamente estudado, ainda existem avanços necessários nesse quesito, principalmente maior financiamento para encorajar investidores a fomentar o usufruto desta fonte energética.

A energia geotérmica pode ser aproveitada de maneira direta, no aquecimento ou resfriamento de um local, aquicultura, bomba de calor geotérmica, ou indireta, em que é possível gerar energia elétrica a partir de fluidos subterrâneos. Entretanto, para melhor usufruto desta energia é necessário ter conhecimento do recurso energético do qual será extraído esse calor. A partir das bibliografias lidas, os recursos de alta entalpia são utilizados para gerar eletricidade, ao passo que os recursos de baixa ou média entalpia são comumente utilizados de forma direta. Além disso, tem-se conhecimento de outra classificação, como as categorias de sistema convectivo hidrotermal, sistema ígneo quente e sistema geopressurizado. É evidente que, ambas as classificações estão relacionadas, já que dependem, inicialmente, do estado fluido e da temperatura que se encontra.

Para obter um proveito mais significativo do recurso geotérmico é necessário empregar sistemas de energia geotérmica. No que diz respeito às bombas de calor

geotérmica, literaturas mostraram que elas podem ser sistema aberto ou fechado, sistemas de geopressurização ou para geração de eletricidade.

Em contrapartida, assim como qualquer fonte energética, sendo ela renovável ou não, existe atrelado a ela impactos sociais e ambientais. Em relação à energia geotérmica, os efeitos decorrentes da utilização dela podem ser benéficos ou maléficos. De acordo com alguns estados da arte, plantas geotérmicas podem gerar empregos diretos e indiretos, bem como o crescimento da sociedade onde esse recurso está inserido. Por outro lado, como impacto negativo, foi observado a sismicidade induzida, subsidência ou geração de gases nocivos à saúde humana.

Dadas as características dos recursos geotérmicos, é possível ter conhecimento de qual sistema geotérmico utilizar para seu aproveitamento e os efeitos causados por ele no meio em que está inserido. Porém, ainda tem poucos estudos sobre este assunto, o que implica em pouco investimento na área e, conseqüentemente, a sua utilização é muito restrita, embora possa ser muito positiva, do ponto de vista de produção energética.

No Brasil, de modo geral, o contexto da utilização de fontes geotérmicas não é apreciável, já que possui outras fontes alternativas disponíveis, cujo limitação do avanço tecnológico nos impede de investir na energia geotérmica. Porém, é possível citar a aplicação da energia de maneira direta, que em relação a geração de eletricidade, não demanda de muita tecnologia, como no caso de piscinas naturais quentes, spa, entre outros.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEXANDRINO, C. H.; HAMZA, V.M. Estimates of heat flow and heat production and a thermal model of the São Francisco craton International. **Journal of Earth Sciences**, v. 97, n. 2, p. 289-306, abr 2008.

ARBOIT, N. K. et al. Potencialidade de utilização da energia geotérmica no Brasil – uma revisão de literatura. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 26, p. 155-168, 2007.

BENFENATTI, M. V. C. **Aproveitamento do potencial geotérmico em mina subterrânea: Um estudo de revisão bibliográfica** . 2017. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017. Disponível em: <http://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/408/1/MONOGRAFIA_AproveitamentoPotencialGeot%C3%A9rmico.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2018.

BOYD, T. L.; LUND, J. W. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. **Geothermics** , USA, v. 60, p. 66-93, jan. 2016.

COSTA, C. et al. **Energia Geotérmica : Impactos Ambientais**, Faculdade de Engenharia e Arquitetura da FUMEC, 2009. Disponível em: <<https://webartigos.com/artigos/energia-geotermica-impactos-ambientais/64893>>. Acesso em: 13 abr. 2018.

DUARTE, D. et al. **Sistemas de trocadores geotérmicos** . 2011. Disponível em: <<http://www.fau.usp.br/arquivos/disciplinas/au/aut0221/Trabalhos%20Finais%202011/Sistemas%20trocadores%20de%20calor%20geot%C3%A9rmico.pdf>>. Acesso em: 26 abr. 2018.

FERREIRA, L. E. T. **Avaliação de recursos geotérmicos sob o estado de Goiás**. 2003. 80f. Dissertação de Mestrado, Observatório Nacional/MCT, Rio de Janeiro, 2003.

GEOHERMAL COMMUNITIES. **Costs and Financial risks of geothermal projects**. Europe, 2010.

GEOHERMAL COMMUNITIES. **Shallow Geothermal Systems**. Europe, 2010.

GEOHERMAL ENERGY ASSOCIATION. **Promoting geothermal energy: Air emissions comparison and externality analysis**. USA, 2013.

GODWIN, K. S. *et al.*. Long-term trends in sodium and chloride in Mohawk River New York: the effect of fifty years of road-salt application. **Environmental Pollution**, USA, v. 124, p. 273-281, dez. 2002.

GOMES, A. J. de L.; HAMZA, V. M. Geothermal gradient and heat flow in the state of Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geofísica**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 4, p. 325-347, 2005.

GOMES, A. J. de L. **Avaliação dos recursos geotérmicos da Bacia do Paraná**. 2009. 94f. Dissertação de Mestrado - Observatório Nacional/MCT, Rio de Janeiro, 2009

HALL, A. *et al.*. Geothermal energy recovery from underground mines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Canada, v. 15, p. 916-924, fev. 2011.

HOLMAN, J. P. **Transferência de calor**. São Paulo: McGraw-Hill, 1983. 639 p.

KAGEL, A.; GAWELL, K. Promoting geothermal energy: air emissions comparison and externality analysis. **The electricity journal**, USA, v. 18, p. 90-99, set. 2005.

KUNZE, J.F; RICHARDSON, A.S. **National program definition study for the non-electrical utilization of geothermal energy**. 1975. 58 f. Dissertação de Mestrado - Idaho National Engineering Laboratory, United States, 1975. Disponível em: <<https://www.osti.gov/biblio/5135396>>. Acesso em: 26 abr. 2018.

LAWANDOVSKI, D. *et al.*. **Energias Alternativas : Vantagens e Desvantagens e viabilidade técnica no Brasil**, 2015. Disponível em: <http://www.ufjf.br/baccan/files/2012/11/Semin%C3%A1rio-Energias-Alternativas_2S2015.pdf>. Acesso em: 27 abr. 2018.

LUND, J. W. Direct Utilization of Geothermal Energy. **Energies**, Colorado, v. 3, p. 1443-1471, ago. 2010.

MARQUES, L. S. O interior da Terra. **Revista USP**, São Paulo, n. 71, p. 20-29, set. 2006.

MENEZES, R. K. D. de. **Energia Geotérmica: Aproveitamento**. [20--]. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/1816203-Energia-geotermica-aproveitamento.html>>. Acesso em: 22 mar. 2018.

MILENIC, D.; VASILJEVIC, P.; VRANJES, A. Criteria for use groundwater as renewable energy source in geothermal heat pump systems for building/cooling purposes. **Energy and Buildings**, Serbia, v. 42, p. 649-657, jan. 2010.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Resenha Energética Brasileira: Resultados 2016**. Junho 2017, 2017. 32 p.

MORAES, D. C. **Medidas de gradiente geotérmico e fluxo de calor em furos de sondagem no Cráton São Francisco**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal da Bahia, 2016. Disponível em: <<http://www.cpgg.ufba.br/gr-geof/geo213/trabalhos-graduacao/Diego-Caribe.pdf>>. Acesso em: 27 abr. 2018.

OGOLA, P. F. A. *et al.*. Lighting villages at the end of the line with geothermal energy in eastern Baringo lowlands, Kenya – step towards reaching the millennium development goals (MDGs). **Renewable and Sustainable Energy Reviews** , Iceland, v. 15, p. 4067-4079, aug. 2011.

PRESS, F. *et al.* **Para entender a Terra** . 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 656 p.

SHORTALL, R. *et al.*. Geothermal energy for sustainable development: A review of sustainability impacts and assessment frameworks. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** , Iceland, v. 44, p. 391-406, jan. 2015.

SOUZA FILHO, M. N. **Avaliação do potencial geotermal da Bacia de Taubaté - SP**. 2012. 60f. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

TAIOLI, F. Recursos energéticos. In: TEIXEIRA, W. *et al.* (Org.). **Decifrando a Terra** . 1. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2000. cap. 22, p. 471-492.

TAIOLI, F. Recursos energéticos e meio ambiente. In: TEIXEIRA, W. *et al.* (Org.). **Decifrando a Terra** . 2. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009. cap. 18, p. 486-507.

TORRES, E. N. **Energias Renováveis**. Centro Universitário Serra dos Órgãos, 2014. Disponível em: < <https://prezi.com/loq3pylex-vj/energia-geotermica/>>. Acesso em: 26 abr. 2018.

UNIVERSIA ENEM. **Litologia: Tempo Geológico, Camadas da Terra e Formação do relevo**. Disponível em: <<http://www.universiaenem.com.br/sistema/faces/pagina/publica/conteudo/texto-html.xhtml?redirect=48853028230648754289882887827>> . Acesso em: 27 abr. 2018.

WICANDER, R.; MONROE, J. S. **Fundamentos de Geologia** . São Paulo: Cengage Learning, 2009. 507 p.

WILLIAMS, C. F. *et al.*. **A Review of Methods Applied by the U.S. Geological Survey in the Assessment of Identified Geothermal Resources**. 2008. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/of/2008/1296/pdf/of2008-1296.pdf>>. Acesso em: 22 fev. 2018.

